



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.02.17.48-TDI

ANÁLISE DOS EFEITOS COMBINADOS DA ILHA DE CALOR E DA POLUIÇÃO DO AR URBANAS

Fernanda Batista Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela Dra. Karla Maria Longo de Freitas, aprovada em 11 de março de 2016.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L9GEKB>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.02.17.48-TDI

ANÁLISE DOS EFEITOS COMBINADOS DA ILHA DE CALOR E DA POLUIÇÃO DO AR URBANAS

Fernanda Batista Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela Dra. Karla Maria Longo de Freitas, aprovada em 11 de março de 2016.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L9GEKB>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Fernanda Batista.
Si38a Análise dos efeitos combinados da ilha de calor e da poluição do ar urbanas / Fernanda Batista Silva. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxxii + 266 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.02.17.48-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.
Orientadora : Dra. Karla Maria Longo de Freitas.

1. Ilha de calor urbana. 2. Poluição do ar. 3. BRAMS. I.Título.

CDU 551.51/551.524(1-21)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

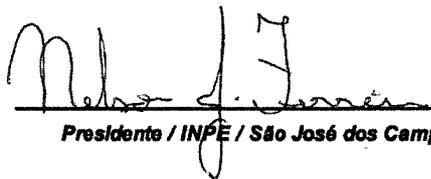
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Fernanda Batista Silva**

Título: "ANÁLISE DOS EFEITOS COMBINADOS DA ILHA DE CALOR E DA POLUIÇÃO DO AR URBANAS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Meteorologia

Dr. Nelson Jesuz Ferreira



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Karla Maria Longo de Freitas



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Saulo Ribeiro de Freitas



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Andrews José de Lucena



Convidado(a) / UFRRJ / Rio de Janeiro - RJ

Dra. Daniela de Azeredo França



Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado força e saúde para chegar ao final deste trabalho. E a Nossa Senhora, por ter “passado na frente” muitas vezes.

A meu esposo, Felipe Marques, que nos momentos de dúvidas, angústias, conquistas e sonhos, que passávamos durante o doutorado, ele estava presente a meu lado.

A minha mãe Julia, a meu pai Ivan, a minha irmã Fabiana e a meus afilhados Miguel e Gabriel, por todo o incentivo e apoio que me deram para concluir este trabalho e pelos ótimos domingos que me ajudavam a esquecer da tese.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro, em forma de bolsa de estudo.

A minha orientadora Dra. Karla Maria Longo e o Dr. Saulo Freitas por toda a paciência e atenção dispensadas.

Ao Dr. Alberto Setzer e ao Dr. Fabiano Morelli pela oportunidade de terminar este trabalho juntamente com minhas atividades profissionais.

Ao Demerval, ao Valter e ao Mauricio, que sempre me ajudavam quando tinha dúvidas emergenciais do BRAMS, sempre me esclareceram sem hesitação.

À Madeleine e ao Marcelo Alonso pela grande ajuda nas questões sobre a química da atmosfera no modelo.

Aos meus amigos e colegas do Grupo de Modelagem e Interface Ambiental (GMAI), em especial, ao Rafael Stockler e à Daniela França.

Aos meus amigos eternos Graziela Meneghetti, Marilei Foss, Roseane Alves e Tatyane Paz que sempre me apoiaram.

À Luciana Ribeiro e à Rita Micheline que me ajudaram a ver as coisas de uma maneira diferente.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta.....Muito obrigada!

RESUMO

Aglomerados urbanos são tipicamente afetados por vários impactos ambientais decorrentes da urbanização, dentre os quais se destacam a Ilha de Calor Urbana (ICU) e as altas emissões de poluentes. O efeito da ilha de calor urbana, por definição, representa o aumento da temperatura nos centros urbanos em relação aos seus arredores. Os gases tipicamente emitidos em ambiente urbanos (monóxido de carbono - CO, óxidos de nitrogênio - NO_x, material particulado - PM10, entre outros) reagem quimicamente e formam outros poluentes, como o ozônio (O₃). Dentre vários fatores, as formações de poluentes secundários dependem da disponibilidade de radiação solar, temperatura e umidade. Esse estudo analisa os efeitos combinados da ICU e da poluição do ar nas condições atmosféricas locais da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para tal, foram utilizados dados observados obtidos a partir de estações meteorológicas e de monitoramento da qualidade do ar, além de simulações numéricas com o modelo regional de transporte químico BRAMS V5.0 (*Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*). Com os dados observados foram identificados os modos de variabilidade espacial e temporal associados à ICU, assim como grupos de poluentes na RMSP. Na análise observacional da interação da ICU e dos poluentes, dois métodos foram adotados: no primeiro encontrou-se uma interação positiva entre o aumento da concentração do O₃ e do PM10 com a intensificação da ICU. Para o CO e NO_x, os resultados demonstraram um aumento da concentração com um valor limite de intensidade da ICU (IICU), a partir desse limite a concentração dos poluentes se estagnaram ou diminuíram. No segundo método, estatisticamente observou-se o aumento da concentração média de O₃ e PM10 com a IICU. Na modelagem numérica, três opções de parametrização urbana foram comparadas, os resultados mostraram que todos os esquemas urbanos representaram satisfatoriamente a ICU na RMSP, sendo que os esquemas com configuração bidimensional (cânions e telhados) apresentaram resultados mais coerentes às características da área urbana. Na análise dos efeitos da ICU e dos poluentes pelas simulações numéricas foi observada na evolução temporal uma relação de fase positiva entre a máxima concentração do O₃ e a máxima IICU, além da existência de uma relação positiva entre intensas ICU e o aumento da concentração do CO, NO_x e O₃. No padrão espacial foram observadas concentrações elevadas do CO, NO_x e O₃ em dias com um maior aquecimento na superfície devido ao atraso na entrada da brisa marítima. No perfil vertical foi identificado o aumento da concentração dos poluentes desde a superfície a altos níveis com a intensificação da temperatura e da ICU. Esse aumento da concentração ocorre devido ao maior aquecimento na superfície das áreas urbanas, que acarreta na configuração da brisa urbana, de maneira que os movimentos ascendentes transportam os poluentes até altos níveis. Contudo, a presença de correntes descendentes faz com que os poluentes retornem para a área urbana, agravando a qualidade do ar.

ANALYSIS OF THE COMBINED EFFECTS OF HEAT ISLAND AND AIR POLLUTION URBAN

ABSTRACT

Urban areas are typically affected by several environmental impacts of urbanization, among which highlight the Urban Heat Island (UHI) and high emissions of pollutants. The effect of the urban heat island, by definition, is the temperature rising in urban areas in relation to its surroundings. Trace gases typically emitted in urban environments (carbon monoxide - CO, nitrogen oxides - NO_x, etc.) react chemically and form other pollutants, such as ozone (O₃). Among other factors, the production of secondary pollutants depends on the availability of solar radiation, temperature and humidity. This study analyzes the combined effects of UHI and air pollution in local weather conditions in the Metropolitan Area of São Paulo (MASP) using an observational data set, obtained from weather and of air quality monitoring stations. Complementary, numerical simulations were carried out with the regional chemical transport model BRAMS V5.0 (Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System). The observational study aimed to identify the spatial and temporal variability modes associated with UHI, as well as groups of pollutants in the MASP. The observational dataset analysis of the interaction of the UHI and pollutants included two methods: the first identified a positive interaction between the concentration of O₃ and PM10 with the intensification of the UHI. For CO and NO_x, the results showed an increase in concentration with a threshold value of the urban heat island intensity (UHII), beyond that limit the concentration of pollutants stagnated or declined. In the second method, there was increase in the average concentration of O₃ and PM10 with UHII, with significance statistic. In the numerical modeling studies, three options of urban parameterization were analyzed; with all of them satisfactorily representing the UHI in the MASP. Nevertheless, the schemes with two-dimensional configuration (canyons and roofs) represented more consistently the characteristics of the urban area. The numerical simulations showed in the temporal evolution a positive phase relationship between the maximum concentration of O₃ and the maximum UHII, besides the existence of a positive relationship between strong ICU and the increase in CO, NO_x and O₃ concentrations. In the spatial pattern, high concentrations of CO, NO_x e O₃ were found on days with a higher heating surface due to the delay in the entry sea breeze. In the vertical profile, was identified in the concentration of pollutants from the surface to high levels by intensifying the temperature and the UHI. This increase in the concentration of pollutants is due to the higher heating surface in urban areas, which results in the configuration of urban breeze, so that the upward movement carries the pollutants up to the higher levels. However, the presence of downdrafts causes the return of urban pollutants, worsening the air quality.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Características da ilha de calor urbana: (a) esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas; e (b) padrão espacial da temperatura na área urbana com o formato de ilha.	2
Figura 2.1 – Emissões relativas de poluentes na RMSP para cada tipo de fonte.	17
Figura 2.2 – Esquema que resume os processos de formação do ozônio troposférico e estratosférico.....	20
Figura 2.3 – Esquema que ilustra a química do ozônio troposférico pelo acoplamento entre os ciclos químicos de O ₃ , HO _x e NO _x . RO ₂ refere-se aos radicais peróxidos orgânicos.....	20
Figura 3.1 - À esquerda, a localização geográfica do Estado de São Paulo no Brasil. À direita, na parte superior e na parte inferior, a RMSP localizada no estado de São Paulo e a RMSP vista de forma ampliada, respectivamente.....	31
Figura 3.2 - Visão tridimensional da RMSP, com Serra da Mantiqueira, da Cantareira, Serra do Mar e parte do litoral Paulista.	32
Figura 3.3 - Número de habitantes na RMSP e evolução percentual da população urbana e rural.	33
Figura 3.4 - Expansão urbana da RMSP.....	33
Figura 3.5 – Distribuição espacial da temperatura aparente da superfície na RMSP inferida pelo Satélite Landsat 7 para: (a) dia 03/09/1999 as 09:57 Horário Local (HL) e (b) dia 30/04/2000 aproximadamente as 10:00HL..	34
Figura 3.6 - Mapa da RMSP com as estações meteorológicas, sendo (1) Parque do Ibirapuera, (2) Aeroporto de Congonhas, (3) Taboão da Serra, (4) Pinheiros, (5) Mirante de Santana, (6) Aeroporto de Guarulhos, (7) São Caetano do Sul, (8) Água Funda e (9) Parelheiros. Na figura do lado esquerdo, a área cinza escura destaca a nova delimitação dos mapas que demarca a RMSP efetiva que foi utilizada no presente estudo. Do lado	

direito, localização das estações da RMSP sobre uma imagem de uso do solo.	36
Figura 3.7 - Distribuição espacial das estações de monitoramento de qualidade do ar na RMSP de acordo com a Tabela 3.2.	37
Figura 3.8 – Ciclo anual da temperatura média do ar e a radiação solar incidente para o período de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2011 na RMSP.	48
Figura 3.9 - Ciclo diurno da temperatura média do ar para o período de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2011 na RMSP.	48
Figura 3.10 - (a) Rosa dos ventos média (direção e intensidade) para o período 2002-2011 e (b) distribuição de frequência de classe da velocidade do vento na RMSP para o período 2002-2011.	49
Figura 3.11- (a) Rosa dos ventos (direção e intensidade) para as estações usadas da RMSP para o período 2002-2011: (a) Pinheiros, (b) Ibirapuera, (c) São Caetano do Sul, (d) Mirante de Santana, (e) Água Funda, (f) Guarulhos e (g) Congonhas.	50
Figura 3.12 - Série temporal (<i>PC loading</i>) da primeira (67%), segunda (24%) e terceira (8%) EOF do modo-T calculadas usando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.	52
Figura 3.13 - Padrão espacial (<i>PC score</i>) da (a) primeira (67%), (b) segunda (24%) e (c) terceira (8%) EOF do modo-T calculadas usando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.	53
Figura 3.14 - Série temporal (<i>PC score</i>) da primeira (49%) e segunda (31%) EOF do modo-S calculadas usando os dados de anomalias de temperatura média horárias na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.	55
Figura 3.15 – Padrão espacial (<i>PC loading</i>) da (a) primeira (49%) e (b) segunda (31%) EOF do modo-S calculadas usando os dados de anomalia de	

temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.....	55
Figura 3.16 - Padrão espacial (<i>PC score</i>) da (a) primeira (78%) e (b) segunda (17%) EOF do modo –T para o verão e o padrão da (c) primeira (75%) e (d) segunda (20%) EOF do modo-T no inverno; esses padrões foram calculados utilizando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.	56
Figura 3.17- Série temporal (<i>PC loading</i>) da primeira e da segunda EOF do modo-T para o (a) verão e o (b) inverno, que foram calculadas utilizando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.....	57
Figura 3.18 - Padrão espacial (<i>PC score</i>) da (a) primeira (69%), (b) segunda (23%) e (c) terceira (6%) EOF do modo-T durante o outono e padrão da (d) primeira (55%), (e) segunda (28%) e (f) terceira (14%) EOF do modo-T durante a primavera; estes padrões foram calculados utilizando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.	58
Figura 3.19 – Série temporal (<i>PC loading</i>) da primeira e segunda EOF do modo-T durante o (a) outono e a (b) primavera, que foram calculadas utilizando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.....	59
Figura 3.20 - (a) Resultado do dendograma com as 9 estações meteorológicas e (b) mapa de distribuição das estações com os 6 grupos homogêneos da RMSP. Cada símbolo (ou cor) corresponde a um dos grupos: grupo 1 (vermelho), grupo 2 (amarelo), grupo 3 (laranja), grupo 4 (verde), grupo 5 (roxo) e grupo 6 (azul).	61
Figura 3.21 - Ciclo diurno anual médio da intensidade da ICU para os diferentes casos: caso 1 (São Caetano do Sul - Parelheiros), caso 2 (Pinheiros -	

Parelheiros), caso 3 (Congonhas / Mirante - Parelheiros), caso 4 (Ibirapuera / Taboão da Serra - Parelheiros), e caso 5 (Guarulhos / USP - Parelheiros).....	63
Figura 3.22 - Ciclo diurno sazonal da intensidade da ICU na RMSP: primavera (verde), outono (marrom), verão (vermelho) e inverno (azul).	64
Figura 3.23 - (a) Dendograma resultante de 11 estações de medição do CO e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 4 grupos homogêneos de CO na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (verde); grupo 2 (amarelo); grupo 3 (vermelho) e grupo 4 (azul).	66
Figura 3.24 - Evolução temporal média do CO no período de 2002-2011 para os 4 grupos definidos na análise de cluster.	67
Figura 3.25 - (a) Dendograma resultante de 10 estações de medição do NO _x e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 4 grupos homogêneos de NO _x na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (azul); grupo 2 (vermelho); grupo 3 (verde) e grupo 4 (amarelo).	68
Figura 3.26 - Evolução temporal média do NO _x no período de 2002-2011 para os 4 grupos definidos na análise de cluster.	68
Figura 3.27 -(a) Dendograma resultante de 13 estações de medição do O ₃ e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 6 grupos homogêneos de O ₃ na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (vermelho); grupo 2 (laranja); grupo 3 (azul); grupo 4 (amarelo); grupo 5 (verde) e grupo 6 (roxo).	70
Figura 3.28 - Evolução temporal média do O ₃ no período de 2002-2011 para os 6 grupos definidos na análise de cluster.	70
Figura 3.29 - (a) Dendograma resultante de 15 estações de medição do PM ₁₀ e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 8 grupos homogêneos de PM ₁₀ na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: azul (grupo 1); amarelo (grupo 2); laranja (grupo 3); marrom (grupo 4); roxo (grupo 5); rosa (grupo 6); verde (grupo 7) e vermelho (grupo 8).	71
Figura 3.30 - Evolução temporal média do PM ₁₀ no período de 2002-2011 para os 8 grupos definidos na análise de cluster.	72

Figura 4.1 - Ocorrência de sistemas frontais na área de estudo nos meses da primavera de 2010.....	79
Figura 4.2 - Ocorrência de sistemas frontais na área de estudo nos meses da primavera de 2011.....	80
Figura 4.3 – Ciclo diurno médio da intensidade da ICU nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2002-2011 (linha preta), Janeiro-Dezembro de 2010 (linha vermelha) e Janeiro-Dezembro de 2011 (linha azul); (b) primavera de 2002-2011 (linha preta), primavera de 2010 (linha vermelha) e primavera de 2011 (linha azul).....	82
Figura 4.4 – Ciclo diurno médio do CO nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) de primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).....	83
Figura 4.5 – Ciclo diurno do NO _x nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).....	84
Figura 4.6 – Ciclo diurno médio do O ₃ nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).....	85
Figura 4.7 – Ciclo diurno médio do PM ₁₀ nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).	86
Figura 4.8 – Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do CO (ppm) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.....	89
Figura 4.9 – Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do O ₃ (ppb) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.....	91
Figura 4.10 - Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do NO _x (ppb) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.	92
Figura 4.11 - Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do PM ₁₀ (µg/m ³) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.	94

Figura 4.12 – Taxa de concentração de CO em diferentes níveis de IICU para o período de: (a) primavera de 2010, (b) primavera de 2011 e (c) primavera de 2010+2011; Taxa de concentração do PM10 em diferentes níveis de IICU para o período de: (d) primavera de 2010, (e) primavera de 2011 e (f) primavera de 2010+2011.....	97
Figura 4.13 – Taxa de concentração de NO _x em diferentes níveis de IICU para o período de: (a) primavera de 2010, (b) primavera de 2011 e (c) primavera de 2010+2011; Taxa de concentração do O ₃ em diferentes níveis de IICU para o período de: (c) primavera de 2010, (d) primavera de 2011 e (e) primavera de 2010+2011.....	99
Figura 5.1 – Estrutura do JULES 3.0.....	112
Figura 5.2 – Alguns dos processos sub-grade simulados pelo modelo BRAMS versão 5.....	114
Figura 5.3 – Representação dos fluxos em cada tiles. A linha tracejada: perfil urbano; linha de ponto e traço: perfil de árvore; linha pontilhada: perfil grama; e linha sólida: perfil médio do grid box.....	116
Figura 5.4 - Balanço de energia na superfície para o esquema de 1T.....	118
Figura 5.5 - Ilustração do esquema de duas camadas (esquerda) e do esquema de uma camada (direita).	121
Figura 5.6 - Geometria 2D simplificada do dossel urbano.....	123
Figura 5.7 - A geometria bidimensional do cânion usado no MORUSES, ilustrando a rede de resistência utilizada na parametrização do comprimento de rugosidade para o calor. Os painéis ilustram: (a) uma ampla geometria de cânion com ambas as regiões de ventilação e de recirculação; e (b) um cânion estreito, com apenas uma região de recirculação.....	124
Figura 5.8 – Domínios das simulações realizadas (a) América do Sul com resolução de 30 km, (b) Região Sudeste com resolução de 10 km e (c) RMSP com resolução de 1 km.....	128
Figura 5.9 – Mapa de uso do solo da RMSP sob o domínio de 1km.....	129

Figura 5.10 - Resultado do teste estatístico (a) Viés Médio, (b) RMSE e (c) Correlação.	135
Figura 5.11 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros na estação de Pinheiros para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	140
Figura 5.12 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros para a estação de Parelheiros para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	141
Figura 5.13 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de São Caetano do Sul para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	142
Figura 5.14 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Guarulhos para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	143
Figura 5.15 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Congonhas para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	144
Figura 5.16 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Mirante para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	145
Figura 5.17 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Água Funda para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.	146
Figura 5.18 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros na estação de Taboão da Serra para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos	

períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.....	147
Figura 5.19 - Ciclo diurno médio da IICU estimado pela observação e pelas simulações com o 1T, o 2T e o MORUSES.....	148
Figura 5.20 - Série temporal da IICU estimada pela observação e pelas simulações com o 1T, 2T e MORUSES para os períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.....	150
Figura 5.21 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	153
Figura 5.22 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	154
Figura 5.23 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	155
Figura 5.24 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	156
Figura 5.25 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	158
Figura 5.26 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	159
Figura 5.27 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	160
Figura 5.28 – Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).....	161

- Figura 5.29 – (a) Mapa de uso do solo com a localização do corte na longitude de 46,7°W, onde região em vermelho indica a área urbana (b) perfil de topografia do corte longitudinal. Destaca-se ao sul a Serra do Mar e ao norte a Serra da Cantareira. A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana..... 164
- Figura 5.30 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana. 166
- Figura 5.31 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana. 167
- Figura 5.32 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana. 168
- Figura 5.33 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana. 169
- Figura 5.34 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana. 172

Figura 5.35 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.	173
Figura 5.36 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.	174
Figura 5.37 – Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha representa superfície não urbana.	175
Figura 5.38 – Evolução temporal do perfil vertical de temperatura e vento para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). ...	178
Figura 5.39 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do CO e da IICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.	183
Figura 5.40 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do NO _x e da IICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.	184
Figura 5.41 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do O ₃ e da IICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.	185
Figura 5.42 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.	187

Figura 5.43 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	188
Figura 5.44 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.....	190
Figura 5.45 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	191
Figura 5.46 - Distribuição espacial do NO _x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.....	192
Figura 5.47 - Distribuição espacial do NO _x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	193
Figura 5.48 - Distribuição espacial do NO _x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.....	195
Figura 5.49 Distribuição espacial do NO _x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	196
Figura 5.50 - Distribuição espacial do O ₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.....	197
Figura 5.51- Distribuição espacial do O ₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	198
Figura 5.52 - Distribuição espacial do O ₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.....	200

Figura 5.53 Distribuição espacial do O ₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.....	201
Figura 5.54 – Evolução temporal do perfil vertical de CO e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.	203
Figura 5.55 – Evolução temporal do perfil vertical de NO _x e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.	204
Figura 5.56 – Evolução temporal do perfil vertical de O ₃ e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.	205

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Característica dos principais poluentes.	16
Tabela 2.2 - Padrões Estaduais e nacionais de qualidade do ar.....	22
Tabela 2.3 - Índice Geral.....	23
Tabela 2.4 - Principais efeitos a saúde em relação a cada poluente atmosférico.	24
Tabela 3.1- Informações das estações meteorológicas da RMSP.	35
Tabela 3.2 - Parâmetros de qualidade do ar monitorados na RMSP.	37
Tabela 4.1 - Concentração dos poluentes para diferentes níveis de IICU na primavera de 2010, primavera de 2011 e primavera de 2010+2011.	101
Tabela 5.1 – Dados meteorológicos de entrada necessários para o modelo JULES.....	111
Tabela 5.2 - Opções físicas de parametrização urbana no JULES.....	115
Tabela 5.3- Configuração horizontal dos domínios utilizados.	127
Tabela 5.4 – Configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações. .	127
Tabela 5.5 – Parâmetros usados na área urbana.....	131
Tabela 5.6 - Testes estatísticos aplicados aos resultados da simulação numérica em cada ponto de estação meteorológica.....	135

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1T	1 Tile
2T	2 Tiles
AC	Análise de Cluster (<i>Cluster Analysis</i>)
BES	Balço de Energia na Superfície
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CCATT- BRAMS	<i>Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CLP	Camada Limite Planetária
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos orgânicos voláteis
CPC	<i>Climate Prediction Center</i>
DMS	Diferenças Mínimas Significativas
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EDGAR	<i>Emission Database for Global Atmospheric Research</i>
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
EOF	<i>Empirical Orthogonal Function</i> (Função Ortogonal Empírica)
EROS	<i>Earth Resources Observation Systems</i>
ERSST	<i>Extended Reconstructed Sea Surface Temperature</i>
HL	Hora Local
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
ICU	Ilha de Calor Urbana

IICU	Intensidade da Ilha de Calor Urbana
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JULES	<i>Joint UK Land Environment Simulator</i>
LEAF	<i>Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model</i>
Meso-NH	<i>Non-hydrostatic Mesoscale Atmospheric Model</i>
MSE	Erro Quadrático Médio
ME	Erro Médio
MORUSES	<i>Met Office Reading Urban Surface Exchange Scheme</i>
MOSES	Meteorological Office Surface Exchange Scheme
N ₂	Nitrogênio
NE	Nordeste
NO	Óxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NPFT's	Tipos não Funcionais de Plantas
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OH	Radical Hidroxila
ONI	<i>Oceanic Niño Index</i> (Índice de Niño Oceânico)
PAN	Nitrato de Peroxiacetila
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PC	<i>Principal Component</i> (Componente Principal)
PFT's	Tipos Funcionais de Plantas
PM10	Material Particulado com raio aerodinâmico de 10 µm
PM2,5	Material Particulado com raio aerodinâmico de 2,5 µm
PPB	Partes por Bilhão

PPM	Partes por Milhão
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
R	Coeficiente de Correlação
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RETRO	<i>REanalysis of the TROpospheric chemical composition</i>
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SVAT	<i>Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Schemes</i>
TRIFFID	<i>Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
USGS	<i>United States Geological Survey's</i>
USP	Universidade de São Paulo
UV	Raios Ultravioleta

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	8
1.2. Estrutura da tese.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Ilha de Calor Urbana.....	11
2.2. Poluentes atmosféricos.....	15
2.2.1. Estudos de qualidade do ar	25
2.3. Ilha de calor e poluentes atmosféricos.....	27
3 ANÁLISE CLIMATOLÓGICA: ICU E POLUENTES ATMOSFÉRICOS....	31
3.1. Introdução.....	31
3.2. Material	31
3.2.1. Caracterização da área de enfoque.....	31
3.2.2. Base de dados observados	34
3.2.2.1. Dados meteorológicos.....	35
3.2.2.2. Dados de qualidade do ar	36
3.3. Métodos	38
3.3.1. Análise de Função Ortogonal Empírica	38
3.3.2. Análise de Cluster.....	44
3.3.3. Intensidade da Ilha de Calor Urbana	47
3.4. Resultados.....	47
3.4.1. Caracterização meteorológica	47
3.4.2. Análise de EOF.....	51
3.4.3. Análise de Cluster.....	60
3.4.4. Intensidade da ICU.....	62
3.4.5. Caracterização da qualidade do ar	64
3.5. Conclusões Parciais	72
4 INTERAÇÃO DA ICU E POLUENTES ATMOSFÉRICOS: ANÁLISE OBSERVACIONAL	77

4.1. Introdução	77
4.2. Material	77
4.2.1. Dados	77
4.2.2. Período de estudo e filtragens	78
4.3. Métodos	86
4.4. Resultados	88
4.4.1. Primeiro método	88
4.4.2. Segundo método	100
4.5. Conclusões Parciais	103
5 MODELAGEM NUMÉRICA: PARAMETRIZAÇÃO URBANA E INTERAÇÃO DA ICU E DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	107
5.1. Introdução	107
5.2. Material	107
5.2.1. Modelo BRAMS	107
5.2.2. O modelo JULES	110
5.2.3. O modelo BRAMS 5.0	113
5.2.4. Parametrizações das áreas urbanas	114
5.2.4.1. Esquema de uma camada.....	116
5.2.4.2. Esquema de duas camadas	119
5.3. Métodos	125
5.3.1. Configuração das simulações.....	125
5.4. Resultados	134
5.4.1. Parametrização de área urbana no JULES	134
5.4.1.1. Avaliação estatística.....	134
5.4.1.2. Série temporal	138
5.4.1.3. Padrão espacial.....	151
5.4.1.4. Padrão vertical	163
5.4.2. Interação da ICU e poluentes atmosféricos: modelagem numérica	179
5.4.2.1. Evolução temporal.....	180
5.4.2.2. Padrão espacial.....	186

5.4.2.3. Análise vertical	202
5.5. Conclusões Parciais	206
6 CONCLUSÕES.....	209
7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	215
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
APÊNDICE A Análise de Forçantes Remotas na ICU.....	237
APÊNDICE B Localização das estações.....	255
APÊNDICE C Séries temporais.....	261

1 INTRODUÇÃO

O processo da urbanização foi extensivamente acelerado desde a Segunda Guerra Mundial. Ao longo dos últimos 50 anos, a taxa de crescimento da população urbana (2,7% anos-1) é superior à da população mundial (1,8% anos-1). Atualmente, mais da metade da população mundial, cerca de 3,6 bilhões de pessoas, vive em áreas urbanas, sendo previsto um aumento de 2,6 bilhões até 2050. Portanto, aproximadamente 6,3 bilhões de pessoas, 60% da população mundial, deverão residir em áreas urbanas em 2050 (UNITED NATIONS, 2011).

Esta rápida urbanização produz mudanças significativas na paisagem natural de uma região, tais como modificações nas propriedades radiativas, térmicas e aerodinâmicas da superfície (OKE, 1987), as quais podem gerar alterações no padrão dinâmico e termodinâmico da atmosfera. Um exemplo importante de alteração nas condições meteorológicas é o surgimento de bolsões térmicos sobre áreas urbanas, conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU) (OKE, 1987; ARYA, 2001; ARNFIELD; 2003).

A principal característica da ICU é o aumento da temperatura do ar em áreas urbanas em relação às áreas periféricas e rurais (OKE, 1982; Figura 1.1a). A distribuição espacial da temperatura da ICU é, tipicamente, marcada por um forte gradiente horizontal no limite urbano-rural e diminuição gradual do centro para as bordas da cidade. Deste modo, o padrão espacial das isotermas se assemelha ao formato de uma ilha, por isso a denominação Ilha de calor (Figura 1.1b). O padrão temporal da ICU é fortemente afetado pela variabilidade das circulações diurnas e noturnas, assim como pelas condições meteorológicas (KIM; BAIK, 2005; SUN et al. 2009; ROTH, 2007).

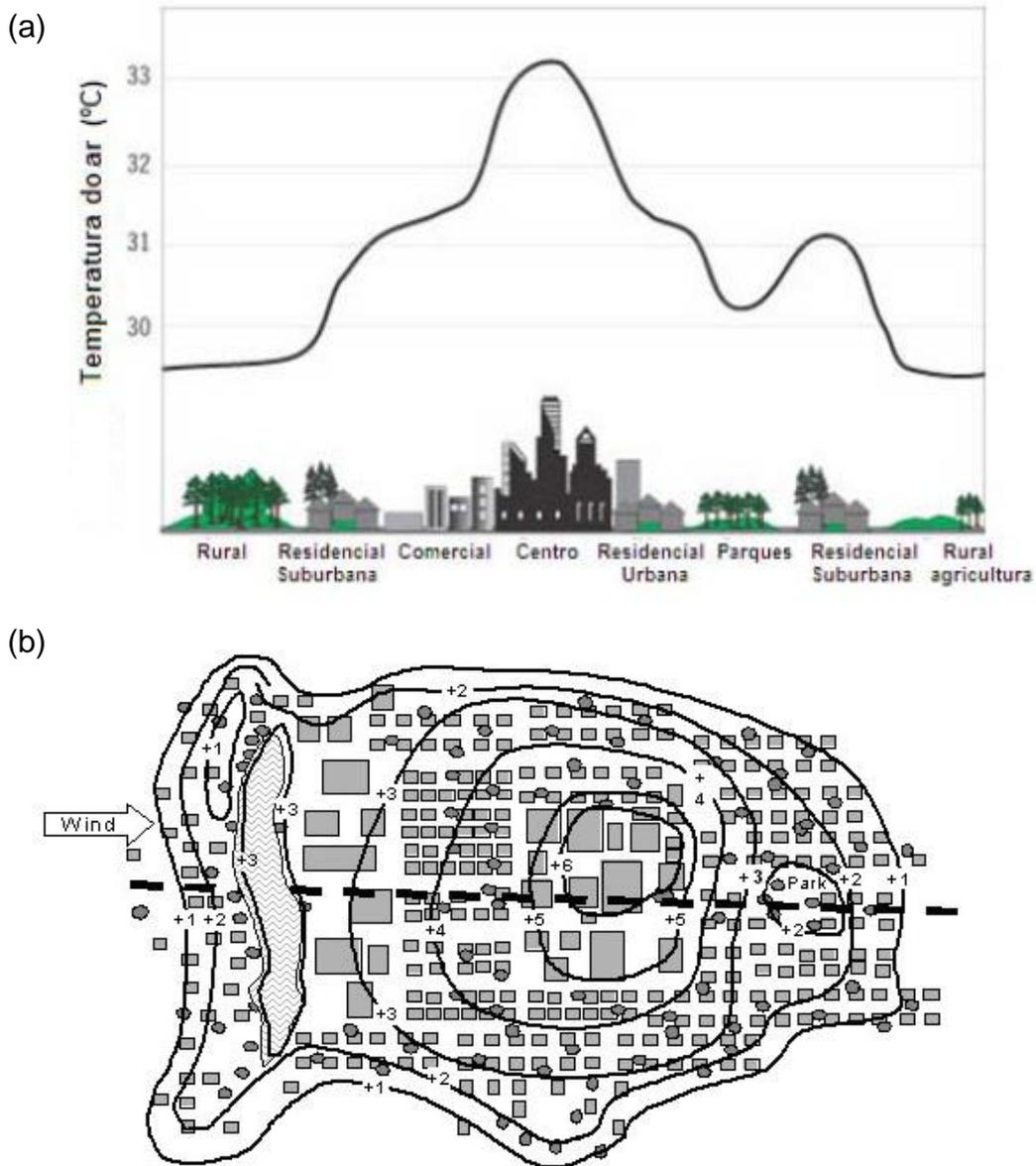


Figura 1.1 – Características da ilha de calor urbana: (a) esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas (Fonte: adaptada de SANTAMOURIS, 2001); e (b) padrão espacial da temperatura na área urbana com o formato de ilha.

Fonte: adaptado de Voogt e Oke (2003).

As primeiras observações que evidenciaram o fenômeno da ICU foram feitas por Howard em 1818 que, ao comparar a temperatura da área central da cidade de Londres com a da área rural, observou valores superiores a 2°C (LANDSBERG, 1981). Desde então, muitas análises observacionais foram realizadas a fim de avaliar a distribuição espacial e temporal da ICU (OKE, 1973; MONTÁVEZ et al., 2000; OLIVEIRA et al.,

2003; ERELL et al., 2007; FUJIBE, 2009; HICKS et al., 2010; HOUTE; PINGEON, 2011; MURPHY et al., 2011). Dentre estes estudos, vários empregaram o uso de técnicas estatísticas, principalmente análises entre a diferença de temperaturas observadas na área urbana e na área rural, evidenciando contrastes na intensidade da ICU nos períodos diurno e noturno, nas estações do ano e até variações nas escalas decadal e interanual (CAMILLONI; BARRUCAND, 2011; OZDEMIR et al., 2011).

O uso é importante dos modelos numéricos de circulação atmosférica e, atualmente, essenciais nos estudos da ICU. Estes modelos possuem, atualmente, um nível de detalhamento das características da superfície e parametrizações mais adequadas na representação dos fenômenos na escala urbana. Vários trabalhos de modelagem numérica enfatizam a análise da ICU e seus efeitos (NIELSEN-GAMMON, 2000; FREITAS, 2003; FREITAS et al., 2007; MORAES, 2008; SILVA, 2010; LUCENA, 2012).

Em geral, o estudo da ICU baseia-se em um melhor detalhamento do Balanço de Energia na Superfície (BES) das áreas urbanas. A modificação do BES nas áreas urbanizadas conduz a anomalias térmicas positivas, favorecendo a formação da ilha de calor (OKE, 1987; HART; SAILOR, 2009). A análise do BES é um requisito para o entendimento de vários impactos da urbanização, por exemplo: comportamento dinâmico e termodinâmico da atmosfera urbana e, indiretamente, poluição atmosférica (FREITAS, 2003).

Com o intuito de representar o BES na área urbana, novas parametrizações foram desenvolvidas e têm sido utilizadas no estudo da ICU. Um importante exemplo são os modelos de dossel urbano, os quais resolvem o balanço de energia da superfície para uma cobertura urbana tridimensional, ou seja, configuração do tipo cânion (MASSON, 2000; MARTILLI et al., 2002; MASSON, 2006; BEST, 2005; BEST et al., 2006; HARMAN; BELCHER, 2006; PORSON et al., 2009; KARAM et al., 2010; PORSON et al., 2010a,b). Os modelos de dossel urbano (também chamados de esquemas de superfície) permitem uma maior acurácia

física no balanço de energia das áreas urbanas e podem ser utilizados sozinhos ou acoplados a modelos atmosféricos. Tipicamente, a estrutura de modelos de dossel urbano segue três parametrizações (MASSON, 2006):

- Edifícios em formato tridimensional;
- Balanço de energia tratado em cada superfície (rua, paredes e telhado);
- Interações radiativas entre paredes e ruas são explicitamente tratadas.

Na última década, o acoplamento de esquemas de superfícies que melhor representam as áreas urbanas aos modelos atmosféricos permitiu um avanço significativo no estudo da ICU (FREITAS, 2003; CHEN et al., 2004; FREITAS; SILVA DIAS, 2005; LEMONSU et al., 2006; FREITAS et al., 2007; GOUVEA et al., 2006; GOUVEA, 2007; SILVA, 2010). No entanto, ainda há muito a ser feito e trabalhos recentes indicam uma tendência para a inclusão de processos cada vez mais detalhados. Por exemplo, o consumo de energia com sistemas de aquecimento e refrigeração é importante na análise das áreas urbanas, principalmente em grandes aglomerados urbanos, por serem fontes de calor que contribuem para o desenvolvimento da ICU (SAILOR, 2011, KOLOKOTRONI et al., 2012). Por outro lado, é indiscutível que o aumento da temperatura na área urbana tem um efeito significativo no consumo de energia requerido pelos edifícios/construções urbanas. Neste contexto, modelos de consumo de energia têm sido implementados nos esquemas de dossel urbano permitindo, assim, uma representação mais realística das características urbanas (CRAWLEY et al., 2010, BUENO et al., 2012).

Nos estudos de identificação e dimensionamento da ICU, o conhecimento dos principais fatores que contribuem no seu desenvolvimento é de fundamental importância, dentre os quais se destacam (LANDSBERG, 1981; OKE, 1982; 1987; GOUVEA, 2007; RIZWAN et al. 2008; HIDALGO et al., 2008):

- Ausência da vegetação e extenso uso de materiais impermeáveis nas construções e pavimentações, induzindo a redução da evaporação;
- Alta capacidade térmica e baixo albedo dos materiais de construção e pavimentação (concreto e asfalto);
- Aprisionamento da energia devido à geometria tridimensional da superfície urbana (configuração do tipo cânion);
- Liberação do calor antropogênico, ou seja, calor associado às atividades antrópicas, tais como: tráfego de veículos, indústrias, metabolismo humano e animal e consumo de energia em geral.
- Alta concentração de poluentes (gases e aerossóis) na atmosfera da área urbana, os quais absorvem e emitem energia;
- Presença de áreas verdes e corpos d'água, também podem fortemente influenciar o padrão espacial da ICU principalmente para a desintensificação e mitigação do fenômeno.

A alta concentração de poluentes permanece sendo um dos problemas mais críticos nas grandes cidades do planeta. Em especial, caracterizam-se pela emissão de monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e uma grande variedade de compostos orgânicos voláteis (COVs). Na presença da luz solar, poluentes secundários, tais como o ozônio (O₃), são formados através de reações fotoquímicas envolvendo NO_x e COVs.

As concentrações dos poluentes primários e os poluentes secundários dependem também das condições meteorológicas, no entanto, os poluentes secundários também dependem das emissões de seus precursores. A alta disponibilidade de radiação, altas temperaturas, calmaria dos ventos, baixa umidade do ar são fatores que favorecem as reações fotoquímicas, além de serem importantes para a formação e intensificação da ICU (YOSHIKADO, 1996; SARRAT et al., 2006).

A circulação local, decorrente da heterogeneidade da superfície, também é essencial na advecção e na difusão dos poluentes (RYU et al., 2012). Um dos efeitos decorrentes da ICU é o aparecimento de uma circulação local típica de áreas urbanas, conhecida como brisa urbana (ou também denominada de circulação da ICU). A brisa urbana é caracterizada pela convergência dos ventos na superfície da área urbana e divergência no topo da camada limite planetária (CLP) da área urbana, sendo observada em muitas cidades. O conhecimento dessa brisa é imprescindível, já que sua circulação influencia a distribuição espacial da concentração dos poluentes nas áreas urbanas (FREITAS et al., 2007, LAI; CHENG, 2009; RYU et al., 2012).

Um outro exemplo de circulação que representa um importante papel na produção e acumulação de poluentes é a brisa marítima/terrestre predominantes na áreas urbanas localizadas em regiões costeiras (MARTILLI 2003; PAPANASTASIOU; MELA, 2009; CHARABI; AL-YAHYAI, 2011). A recirculação dos poluentes pela brisa marítima/terrestre tende a elevar significativamente os níveis de ozônio em áreas urbanas costeiras. Os precursores do O_3 da área urbana são advectados sobre a água através da circulação de brisa terrestre, assim, O_3 é fotoquimicamente produzindo sobre o mar. No entanto, como o ozônio não é facilmente depositado sobre a água, a massa de ar rica em O_3 é advectada de volta ao continente pela circulação de brisa marítima (MARTINS et al., 2012). Adicionalmente, áreas caracterizadas pela presença de maciços, serras e montanhas, também estão sujeitas a ocorrência de brisas vale/montanha, que transportam os poluentes das áreas urbanas para regiões mais elevadas. Dessa forma, as várias circulações locais (brisa marítima/terrestre, brisa vale/montanha e brisa urbana) se desenvolvem interativamente, produzindo um efeito líquido sobre a qualidade do ar que pode vir a ser substancial, como foi observado por Ryu et al. (2012) na área metropolitana de Seoul.

Diversos estudos sobre caracterização da poluição urbana estão disponíveis na literatura científica, como por exemplo, a identificação da qualidade do ar através da concentração dos poluentes (CARVALHO et

al., 2004; PIRES, 2005; FREITAS et al., 2007; ANDRADE et al., 2015; CARVALHO et al., 2015), a análise da poluição do ar e os seus efeitos nocivos à saúde humana, tais como as doenças cardiorrespiratórias (GOUVEA et al., 2003; DE OLIVEIRA; FERREIRA, 2007; IGNOTTI et al., 2010). Entretanto, a análise das interações entre a ilha de calor urbana e a poluição do ar tem sido alvo de poucas pesquisas, o que, portanto, motivou este trabalho, no qual se explorou a identificação e compreensão de tais processos.

Estudos já apontaram que, em regiões urbanas poluídas, são observadas uma relação direta entre a abundância de poluentes secundários como o ozônio e seu acréscimo com o aumento da temperatura (LENZI; FAVERO, 2000; SARRAT et al., 2006). Pesquisas sugerem que o fenômeno da ICU influencia os níveis de poluentes primários e secundários, já que pode acentuar a turbulência da área urbana e, portanto, alterar significativamente a distribuição espacial da concentração e impactar a química atmosférica (LAI; CHENG, 2009; AGARWAL; TANDON, 2010).

Neste contexto, justifica-se a importância de ampliar e melhorar o conhecimento científico das interações entre a ICU e a qualidade do ar. Propõe-se, portanto, a seguinte hipótese:

A ocorrência do fenômeno da ICU pode afetar a concentração dos poluentes atmosféricos, assim como a presença de poluentes na atmosfera urbana influencia o padrão da ICU.

E pretende-se, neste trabalho, contribuir para a construção do conhecimento que permita responder a seguinte questão:

Quais são os efeitos combinados decorrentes da influência mútua da ICU e da poluição do ar?

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste estudo é analisar os efeitos combinados da ilha de calor e da poluição do ar urbana, e avaliar os potenciais impactos decorrentes da interação entre elas.

Mais especificamente, propõem-se:

- Avaliar, a partir de observações, a variabilidade temporal e espacial da ICU na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), identificando padrões nas escalas anual, interanual e sazonal.
- Avaliar, a partir de observações, a distribuição temporal e espacial dos poluentes atmosféricos na RMSP, identificando padrões nas escalas anual, interanual e sazonal.
- Identificar, a partir de observações, os efeitos combinados entre a ICU e a poluição do ar, analisando a influência mútua entre eles.
- Implementar em um modelo de circulação atmosférica um esquema numérico de parametrização de área urbana destinado a representar a área urbana.
- Identificar, a partir da modelagem numérica, os efeitos combinados entre a ICU e a poluição do ar, e analisar a influência mútua entre eles.
- Investigar os principais processos envolvidos nas interações entre a ICU e a poluição do ar.

1.2. Estrutura da tese

Esta tese consiste de 6 capítulos, estruturados como unidades de auto conteúdo. Portanto, cada capítulo tem uma introdução, materiais e métodos, resultados e conclusões parciais.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: São apresentados os principais estudos que abordam o fenômeno da ICU, assim como uma

fundamentação teórica sobre poluentes atmosféricos de áreas urbanas e uma descrição de alguns trabalhos relevantes que abordam esses assuntos.

Capítulo 3 - Análise climatológica da ICU e dos poluentes do ar: Este capítulo apresenta a descrição climatológica da RMSP, área considerada como enfoque nesse estudo. As aplicações de testes estatísticos nos dados ilustram a variabilidade temporal e espacial da ICU, bem como a regionalização/homogeneização do fenômeno. Neste capítulo, também são apresentados os padrões de comportamento espacial e temporal dos poluentes atmosféricos na RMSP.

Capítulo 4 - Interações da ICU e dos poluentes atmosféricos: uma análise observacional: Neste capítulo apresenta-se, com bases em dados observados na RMSP, uma análise da relação da ilha de calor urbana com os poluentes atmosféricos. Evidenciou-se o efeito da ICU, em diferentes níveis de intensidade, nos vários poluentes observados.

Capítulo 5: Interações da ICU e dos poluentes atmosféricos: Neste capítulo, primeiramente são apresentadas às análises das parametrizações urbanas implementadas no modelo numérico. Além disso, os processos de interação da ICU com os poluentes do ar são detalhados através da análise de resultados de modelagem químico/atmosférica. Estudos de casos são simulados e apresentados. As avaliações dos resultados dessas simulações também são discutidas.

Capítulo 6 – Conclusões: Este capítulo integra as informações apresentadas nos capítulos anteriores, extraindo os resultados pertinentes e colocando-os em contexto com respeito aos objetivos principais da tese. O capítulo de conclusão também fornece uma visão geral sobre as conexões entre a ilha de calor urbana e os poluentes atmosféricos.

Capítulo 7 – Perspectivas de trabalhos futuros: Nesse capítulo são apresentadas questões e sugestões futuras de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ilha de Calor Urbana

A literatura sobre a análise da Ilha de Calor Urbana avançou extensivamente nos últimos anos, principalmente no enfoque de metodologias e abordagens que caracterizam esse fenômeno, como nos estudos de séries temporais climatológicas (LOMBARDO, 1984; FIGUEROLA; MAZZEO, 1998; MONTÁVEZ et al., 2000; CAMILLONI; BARRUCAND, 2011), nas análises da interação da ICU com as circulações locais (FREITAS, 2003; FREITAS et al., 2007, MORAES, 2008; SILVA, 2010); na análise dos efeitos da morfologia e geometria urbana no padrão de temperatura e na ICU (GONÇALVES et al., 2002; SVENSSON, 2004; FERREIRA et al., 2011), e, mais recentemente, em estudos da análise da ICU com o uso do sensoriamento remoto (FUCKNER, 2008; OGASHAWARA; BASTOS, 2012; LUCENA et al. 2013; BASTOS, 2014) e modelagem atmosférica (FREITAS et al., 2007; MORAES, 2008; SILVA, 2010; JOHANSSON et al., 2013). Além de abordagens na investigação da ICU e suas implicações no conforto e na saúde humana (GOUVÊA, 2007; AZEVEDO et al., 2012, ARAÚJO et al., 2015).

Uma fundamentação teórica sobre o fenômeno da ICU e uma revisão sobre os principais estudos que abordam e caracterizam esse fenômeno podem ser encontrados em Arnfield, 2003; Hidalgo et a., 2008; Rizwan et al., 2008; Mirzaei; Haghigat, 2010; Lucena et al, 2012.

Um dos fatores mais importantes na caracterização da intensidade da ilha de calor urbana que tem sido amplamente investigado são os estudos que evidenciam o feedback entre a ICU e as circulações locais.

Silva (1986) identificou a relação da ICU e as circulações de brisa para a RMSP através do uso de um modelo bidimensional destinado para o estudo de circulações associadas aos fenômenos da brisa marítima-terrestre, ICU e a brisa de vale-montanha. Verificou-se que há um atraso na brisa marítima na RMSP em decorrência da presença da região

urbana. Além de observar que o efeito da topografia combinado com a ICU provoca um maior desenvolvimento vertical na Camada Limite Planetária, acarretando em um aumento na sua temperatura média. Além disso, o efeito da topografia provoca uma intensificação geral da circulação associada à brisa marítima.

Pereira Filho (2000) demonstrou que a ICU combinada com a umidade da brisa marítima pode afetar o desenvolvimento da convecção local na RMSP. A mistura de ar seco e quente da área urbana com o ar relativamente úmido e frio do mar favorece a instabilidade convectiva e o desenvolvimento de células convectivas muito intensas na RMSP.

Alguns resultados discordam daqueles obtidos por Silva (1986), como Freitas (2003), que verificou que a área urbanizada da RMSP contribui para uma propagação mais rápida da frente da brisa até a porção sul em decorrência das circulações geradas pela ICU e um atraso na chegada da frente de brisa na zona norte. Além disso, verificou-se que a ICU faz com que a velocidade dos ventos da circulação de brisa marítima é mais intensa, ocasionado pela forte convergência gerada pela ilha de calor urbana.

Freitas et al. (2007) observaram que a interação entre a brisa marítima e a ICU é mais significativa quando regiões urbanas maiores estão envolvidas e a área urbana é suficientemente longe da costa, de tal modo que, a ICU tenha tempo para se desenvolver. Esses resultados apontaram que a ICU da RMSP forma uma zona de forte convergência no centro da cidade de São Paulo, a qual atua para acelerar a frente de brisa do mar até atingir o centro da cidade da RMSP. Em decorrência dessa forte zona de convergência no centro da cidade, as circulações induzidas a partir da RMSP atuam no sentido de bloquear a brisa marítima ao longo da cidade por cerca de duas horas, carregando uma grande quantidade de umidade da superfície para níveis superiores da atmosfera urbana. No entanto, posteriormente, a brisa marítima avança além da cidade quando a ilha de calor se dissipa.

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, vários estudos demonstraram a relação da ICU com as circulações de brisa e os padrões sinóticos. Moraes (2008) analisou os mecanismos envolvidos na formação/intensificação/desintensificação da ICU na RMRJ para situações sinóticas distintas. Na avaliação de formação e desintensificação da ICU em dois períodos distintos, verificou-se que, sob o domínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a ICU é menos intensa devido a uma atuação mais marcante da brisa marítima. Este aspecto foi identificado como um fator importante no mecanismo de desintensificação da ICU por atuação da brisa na RMRJ. No período que houve a passagem de um sistema frontal, verificou-se que, nos dias que antecedem a aproximação da frente fria, a brisa marítima não ficou tão bem configurada, o que propiciou a elevação da temperatura na RMRJ.

Marques Filho et al. (2009) através da análise de variáveis termodinâmicas apresentaram um estudo da evolução temporal da ICU na RMRJ. Três grupos de estações foram identificados a partir das análises: urbano, marítimo e vegetado. O comportamento da ICU foi determinado pela evolução temporal da diferença da temperatura virtual entre o grupo da área urbana e o grupo da área vegetada. Os autores encontraram que a ICU na RMRJ tem uma característica diurna, com um máximo pela manhã por volta das 10:00 Hora Local (HL). Durante o fim da tarde e o início da noite a diferença é negativa, indicando que a área vegetada é mais quente que a área urbana. O máximo valor negativo ocorre por volta das 18:00HL. Uma consequência dessa situação é o enfraquecimento dos ventos sobre a área urbana (brisa urbana).

Silva (2010) investigaram as relações existentes entre as circulações locais e a formação da ICU na RMRJ através do uso do esquema urbano acoplado ao modelo atmosférico. Na análise do campo horizontal de temperatura e vento nas simulações com e sem o esquema urbano foram encontrados máximos de temperatura na região urbana marcando a presença da ICU na RMRJ, principalmente nos horários das 15HL e 18HL. No entanto, na simulação com o esquema urbano são evidenciados ventos menos intensos na região dos maiores núcleos de

temperatura. Estes ventos mais fracos contribuem para a menor mistura do ar quente da área urbana com o ar menos quente da vizinhança favorecendo, assim, a uma ICU bem definida na RMRJ. Na análise vertical do campo de temperatura e vento foi identificada a circulação da brisa urbana, característica da ICU, com a ocorrência de movimentos ascendentes na região urbana.

Lucena et al. (2013), através da realização do mapeamento termal considerando as características atmosféricas e o uso do solo, identificou as regiões mais quentes na RMRJ. Três campos termais foram definidos através do uso de imagens de satélite Landsat5-TM para eventos do inverno escolhidos para diferentes décadas de 1980, 1990 e 2000. Os resultados evidenciaram uma concentração de núcleos mais quentes nas áreas urbanas centrais, assim como em algumas áreas suburbanas. Regiões com menores temperaturas correspondem às áreas vegetadas que estão longe da parte central da RMRJ, incluindo pontos das áreas suburbanas, além de outras áreas próximas do litoral coberta com floresta, em torno de lagoas e na região costeira ao norte da Baía de Guanabara, portanto, regiões com forte influência da brisa marítima. Com o reconhecimento espacial das áreas mais quentes, bem como áreas mais frescas, se torna mais fácil o entendimento e estabelecimento dos focos da ICU.

Além da importância para os processos de formação e inibição da ICU, as circulações locais, como a brisa marítima/terrestre, tem papel importante na dispersão da concentração dos poluentes e, portanto, contribuem na intensificação da turbulência atmosférica e, conseqüentemente, no aprisionamento do ar poluído próximo às cidades ou no transporte dos poluentes para regiões mais afastadas das fontes (BERNADET, 1992). Diante desse contexto, a próxima seção traz uma breve fundamentação teórica sobre os principais poluentes atmosféricos, bem como estudos que demonstram sua relação com outras características.

2.2. Poluentes atmosféricos

O problema da poluição do ar nas áreas urbanas ocorre desde o século XIX, na Inglaterra no início da revolução indústria, e hoje é um dos problemas mais graves de saúde pública, principalmente nas grandes cidades, já que essas, na maior parte dos casos, apresentam deficiência de planejamento e infraestrutura.

A caracterização dos poluentes da área urbana pode ser dividida de acordo com sua origem, em duas categorias: os poluentes primários são diretamente emitidos pelas fontes; e poluentes secundários são formados na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e/ou os constituintes naturais da atmosfera. Adicionalmente, podem ser divididos pelos tipos de fontes de emissão: fontes fixas e móveis. Das fontes fixas, as indústrias são as fontes de maior potencial poluidor. Destacando-se também, as usinas termoelétricas, que utilizam carvão, óleo combustível ou gás, assim como os incineradores de resíduos sólidos, com um alto potencial poluidor. Existem ainda as fontes fixas naturais, como vulcões, que também podem influenciar a composição do ar. Das fontes móveis, os veículos automotores, juntamente com os trens, aviões e embarcações marítimas são as principais fontes de poluentes atmosféricos. Nas áreas urbanas, os veículos se destacam como as principais fontes.

A descrição dos principais poluentes abordados neste estudo, como suas características, quais suas origens principais e seus efeitos ao meio ambiente estão na Tabela 2.1.

Em cada cidade a distribuição dos poluentes para cada fonte de emissão varia significativamente e envolve um levantamento de diversos fatores. A Figura 2.1 mostra a origem de emissão dos principais poluentes em cada porcentagem de fonte para a RMSP. Na RMSP, assim como em outras regiões metropolitanas, os problemas de qualidade do ar associados aos poluentes primários ocorrem principalmente em função dos poluentes provenientes dos veículos.

Tabela 2.1 – Característica dos principais poluentes.

Poluente	Características	Fontes principais	Efeitos no Meio ambiente
Partículas inaláveis Finas (PM _{2,5})	Partículas de material sólido ou líquidas suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho ≤ 2,5 micra.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas inaláveis (PM ₁₀)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho ≤ 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), poeira ressuspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	-----
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Fonte: Adaptado de CETESB (2014).

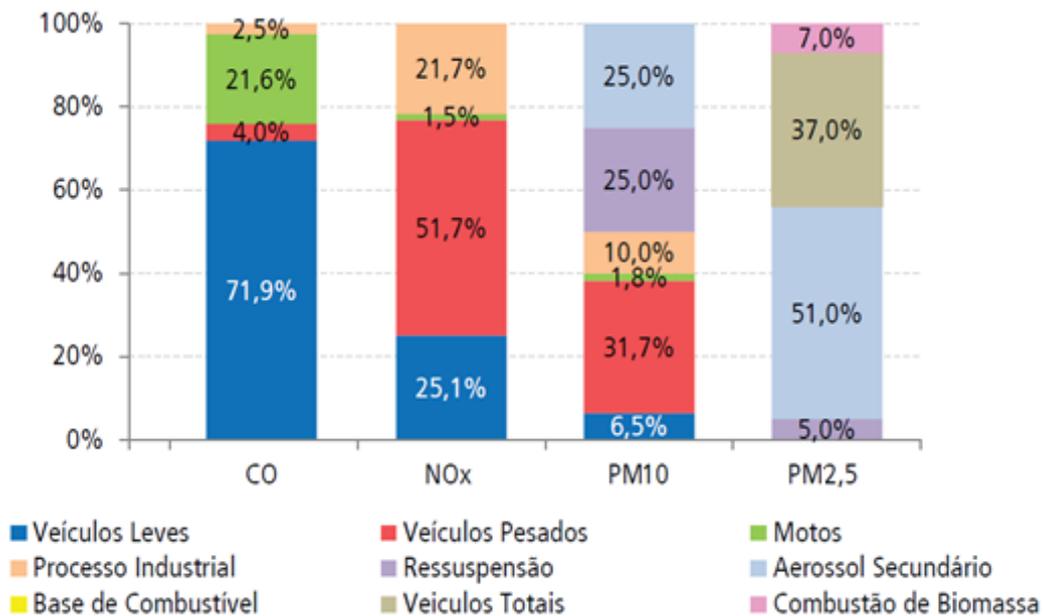


Figura 2.1 – Emissões relativas de poluentes na RMSP para cada tipo de fonte.
 Fonte: CETESB (2014).

Nas grandes cidades, como a RMSP e a RMRJ, o monóxido de carbono é produzido essencialmente pela combustão dos veículos leves. Apesar da quantidade de veículos leves terem aumentado consideravelmente nos últimos anos, a taxa de concentração do CO, tem diminuído consideravelmente em virtude dos limites que foram estipulados pelas agências e institutos ambientais de cada estado. Na RMSP, por exemplo, a concentração do CO, desde 2008, não ultrapassa o padrão de qualidade do ar em nenhuma das estações de observação. Em atendimento aos rígidos limites estipulados pelo PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, coordenado pelo IBAMA criado em 06 de maio de 1986 a partir da Resolução nº 18 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA) e pelo PROMOT (Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares, criado em 2002, introduzido pela Resolução nº 297/2002 do CONAMA, com o objetivo de complementar o controle do PROCONVE), a queda da concentração do CO na RMSP foi mais acentuada na década de 1990, e nos últimos anos os níveis de CO se aproximaram da estabilidade (CETESB, 2014).

As partículas inaláveis/inaláveis finas (PM10 e PM2,5) são principalmente produzidas nos processos de combustão de origem veicular, a partir de emissão direta e também a partir dos gases precursores emitidos como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de Nitrogênio (NO_x=NO₂+NO) e compostos orgânicos voláteis (COVs) que reagem na atmosfera dando origem ao material particulado secundário. As partículas inaláveis finas penetram mais profundamente no trato respiratório causando maiores danos à saúde humana.

Os óxidos de Nitrogênio (NO_x) são precursores do ozônio, e são originados, principalmente, no processos de combustão de veículos pesados. O NO_x é o poluente que apresentou os piores índices de qualidade do ar nos últimos anos nas megacidades. Na RMSP, a partir de janeiro de 2012 a fim de atender uma das fases do PROCONVE, estabeleceu-se a entrada no mercado dos veículos pesados (caminhões e ônibus novos) com menores níveis de emissão de poluentes. No entanto, a expectativa, de acordo com o Relatório em 2011 da agência que regulariza a qualidade do ar no estado de São Paulo (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB), é que possa demorar alguns anos para que os veículos com essa tecnologia sejam em número expressivo na frota circulante e impactem positivamente a emissão desse poluente.

A concentração dos poluentes na atmosfera, além de estar associada com a distribuição e intensidade das emissões, é também influenciada diretamente pela topografia e pelas condições meteorológicas. A região Sudeste, assim como a RMSP e a RMRJ, possui estações do ano bem distintas, com variações sazonais significativas das condições atmosféricas, distinguindo-se claramente as condições de inverno e verão. Por esse motivo, a qualidade do ar piora em certas estações do ano. Na RMSP, por exemplo, o monóxido de carbono e o material particulado apresentam maiores concentrações durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Os poluentes primários, nessa mesma região, apresentam concentrações mais altas no período compreendido entre os

meses de maio a setembro, devido à maior ocorrência de inversões térmicas em baixos níveis, frequente ocorrência de calmaria, ventos fracos e baixos índices pluviométricos.

Como já exposto, o ozônio é um poluente secundário originado a partir de alguns precursores. O processo de formação do ozônio em altitudes elevadas (estratosfera) ocorre através da ação fotoquímica dos raios ultravioleta (UV) sobre as moléculas de oxigênio. Esses raios são suficientemente intensos para separar os dois átomos que compõem a molécula de O_2 , produzindo assim o oxigênio atômico, O . A produção de ozônio é realizada numa etapa imediatamente posterior, resultando da associação de um átomo de oxigênio e uma molécula de O_2 na presença de um catalisador (TOMASONI, 2009). O ozônio na estratosfera tem a responsabilidade de filtrar a radiação solar em alguns comprimentos de onda (absorve toda radiação ultravioleta B, chamada UV-B e uma parte de outros tipos de radiação), além de manter a Terra aquecida, impedindo que todo o calor emitido sobre a superfície do planeta se dissipe.

Em contrapartida, o ozônio presente na troposfera é um perigoso poluente, por provocar problemas respiratórios na população pelo chamado nevoeiro fotoquímico (*smog*, em inglês) (ABELSHON et al., 2002; LIN et al., 2003). O ozônio é formado a partir de substâncias presentes na atmosfera, tendo como reagentes principais para sua formação o NO_x e COVs. Essa forma de produção de ozônio pode ter grandes implicações, uma vez que as moléculas de O_3 viajam por grandes distâncias (até 800 km) a partir das fontes de emissão e produção. A Figura 2.2 ilustra a geração de O_3 na troposfera e na estratosfera.

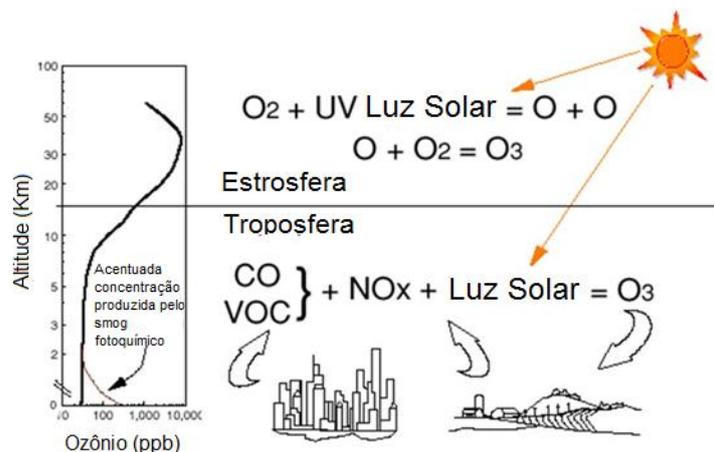


Figura 2.2 – Esquema que resume os processos de formação do ozônio troposférico e estratosférico.

Contudo, o processo de formação do ozônio tem início na reação de moléculas orgânicas com o radical hidroxila (OH), um radical livre que não reage com os maiores constituintes da atmosfera (N_2 , O_2 , CO_2 e H_2O) devido as suas fortes e energéticas ligações moleculares, e que, mesmo assim, é considerado uma das espécies reativas mais importantes da troposfera (ARAGÃO, 2010). Nesse ciclo, uma cadeia de oxidação do CO e hidrocarbonetos, na presença de NO_x , pelos radicais ($HO_x = OH\cdot +$ hidrogênio + radicais peróxidos) formam o ozônio (JACOB et al., 2000). A Figura 2.3 ilustra o acoplamento entre os ciclos químicos de O_3 , HO_x e NO_x na troposfera.

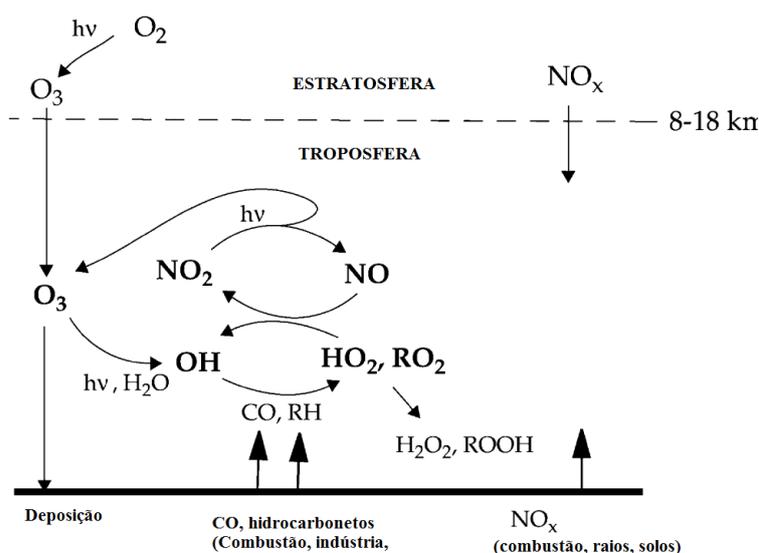


Figura 2.3 – Esquema que ilustra a química do ozônio troposférico pelo acoplamento entre os ciclos químicos de O_3 , HO_x e NO_x . RO_2 refere-se aos radicais peróxidos orgânicos.
Fonte: Adaptado de Jacob et al. (2000).

Nas grandes áreas urbanas como a RMSP, a potencialidade da formação do ozônio é alta em virtude da alta emissão dos seus precursores (COVs e NO_x). Mas, no entanto, sua frequência de ocorrência está associada diretamente com as condições meteorológicas. Dentre as condições meteorológicas que mais influenciam a formação do ozônio próximo à superfície estão: a nebulosidade, a radiação solar incidente, as altas temperaturas e os movimentos horizontais e verticais que transportam os precursores do ozônio, assim como o próprio ozônio, de uma região para outra.

Assim como os poluentes primários, o ozônio apresenta variações sazonais. Ao longo dos meses o ozônio tem uma distribuição de concentração bastante distinta dos poluentes primários, uma vez que este poluente é formado na atmosfera por reações fotoquímicas que dependem da radiação solar, dentre outros fatores. Na RMSP, as maiores concentrações do ozônio ocorrem entre setembro e março (primavera e verão), meses mais quentes e com maior intensidade de luz solar (maior incidência de radiação no topo da atmosfera). Contudo, nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro) não são observados os maiores valores de O₃, provavelmente em função do aumento da nebulosidade devido à atividade convectiva, que reduz a quantidade de radiação solar incidente no período da tarde e, conseqüentemente, diminui a formação do ozônio na baixa atmosfera. O maior número de ocorrências de ultrapassagem no padrão no Estado de São Paulo é registrado geralmente na transição entre os períodos seco e chuvoso (meses de setembro e outubro). (CETESB, 2014).

Para os valores da concentração dos poluentes são determinados critérios e limites para episódios críticos de poluição do ar. A legislação Estadual (Decreto Estadual nº59.113 de 23/04/2013) e o CONAMA (Resolução nº 03 de 28/06/1990) estabelece critérios de qualidade do ar na RMSP, que estão apresentados na Tabela 2.2. A declaração dos estados de Atenção, Alerta e Emergência, além dos níveis de

concentração excedidos, requer a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

Tabela 2.2 - Padrões Estaduais e nacionais de qualidade do ar.

Parâmetros	Atenção		Alerta		Emergência	
	Padrão estadual	Padrão Nacional	Padrão estadual	Padrão Nacional	Padrão estadual	Padrão Nacional
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	250 (24h)	250 (24h)	420 (24h)	420 (24h)	500 (24h)	500 (24h)
Monóxido de Carbono (ppm)	15 (8h)	15 (8h)	20 (8h)	30 (8h)	40 (8h)	40 (8h)
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200 (8h)	400 (1h)	400 (8h)	800 (1h)	600 (8h)	1000 (1h)
Dióxido de Nitrogenio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1130 (1h)	1130 (1h)	2260 (1h)	2260 (1h)	3000 (1h)	3000 (1h)

Fonte: Adaptado de CETESB (2014)

A correlação entre um índice com a concentração dos poluentes com base nos padrões de qualidade do ar é mostrada na Tabela 2.3. A relação entre índice, qualidade do ar e efeitos à saúde é apresentada na Tabela 2.4. A classificação da qualidade do ar também é representada segundo uma escala de cores.

Tabela 2.3 - Índice Geral

Qualidade	Índice	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	Significado
N1-Boa	0-40	0-50	0-100	0-9	0-200	
N2-Moderada	41-80	>50-100	>100-130	>9-11	>200-240	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3-Ruim	81-20	>100-150	>130-160	>11-13	>240-320	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios.
N4- Muito ruim	121-200	>150-250	>160-200	>13-15	>320-1130	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5-Péssima	>200	>250	>200	>15	>1130	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: Adaptado de CETESB (2014).

Tabela 2.4 - Principais efeitos a saúde em relação a cada poluente atmosférico.

Qualidade	Índice	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h
N1-Boa	0-40	0-50	0-100	0-9	0-200
N2-Moderada	41-80	>50-100 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>100-130 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>9-11 Pessoas com doenças cardíacas podem apresentar sintomas como cansaço e dor no peito.	>200-240 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
N3-Ruim	81-20	>100-150 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.	>130-160 Pessoas com doenças respiratórias, como asma, e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.	>11-13 População em geral pode apresentar sintomas como cansaço. Pessoas com doenças cardíacas têm os sintomas como cansaço e dor no peito agravados.	>240-320 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias e crianças têm os sintomas agravados.
N4- Muito ruim	121-200	>150-250 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral	>160-200 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.	>13-15 Aumento de sintomas em pessoas cardíacas. Aumento de sintomas cardiovasculares na população em geral.	>320-1130 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
N5-Péssima	>200	>250 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.	>200 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica.	>15 Agravamento das doenças cardiovasculares, como infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca congestiva.	>1130 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica.

Fonte: Adaptado de CETESB (2014).

2.2.1. Estudos de qualidade do ar

Diversos estudos evidenciam a caracterização dos poluentes de origem antrópicos urbanos, assim como relacionam sua dispersão com fatores locais e outros agentes externos, bem como mostram a relação dos poluentes urbanos com as doenças cardiorrespiratórias.

Freitas et al. (2004) através de um módulo simples de emissão de gases introduzido no modelo atmosférico realizou previsões operacionais da concentração de CO para a RMSP, evidenciando que a passagem da brisa marítima intensifica o transporte dos poluentes, tanto na vertical quanto na horizontal na RMSP. Estes resultados mostraram que durante o período noturno, por ocasião das circulações de brisa terrestre e dos ventos de montanha, altas concentrações de CO são verificadas sobre grande parte do litoral paulista. Durante o dia, os poluentes originados na RMSP, podem ser transportados para regiões bem distantes, em decorrência da penetração da brisa marítima, regiões localizadas a noroeste da RMSP são altamente afetadas, chegando a ter concentrações maiores que aquelas próximas das fontes.

Carvalho et al. (2004) realizou um estudo diagnóstico da qualidade do ar através da análise das observações de ozônio e seus precursores na RMRJ durante o ano de 2002. Além da análise diagnóstica, foram feitas correlações dos índices desses poluentes com parâmetros meteorológicos. Estes resultados mostraram que a região central da RMRJ, Estação Centro, apresentou as maiores concentrações médias mensais do poluente ozônio. Na análise da variação média horária da concentração do ozônio, foi possível a determinação do horário das concentrações máxima, em geral, as maiores médias horárias de concentração de ozônio foram registradas no meio da tarde, às 15HL. Na correlação com as variáveis meteorológicas, encontrou-se que as maiores concentrações de ozônio são observadas, geralmente, em dias com temperaturas altas e com baixa umidade relativa do ar. Mas, no que se refere às relações entre o ozônio e a temperatura do ar, verificou-se que maiores índices de O₃ eram associados a dias com temperaturas acima

de 27°C. Evidenciou-se que, para temperaturas até 27°C, esse comportamento era linear, ou seja, maiores concentrações de O₃ correspondiam a temperaturas mais altas. A partir deste ponto, um aumento da temperatura do ar não conduz a maiores valores das concentrações de ozônio.

Lyra et al. (2011) com a aplicação de regressão linear múltipla ajustou dois modelos à concentração média de 24h do PM₁₀ na RMRJ. Num dos conjuntos de variáveis foram usados os elementos meteorológicos (temperatura, umidade do ar, precipitação, velocidade do vento, direção do e pressão atmosférica). Dentre os elementos meteorológicos avaliados, a umidade relativa do ar e a precipitação explicam a maior parte da variabilidade do PM₁₀ na cidade do Rio de Janeiro. A direção do vento é o elemento menos significativo, sendo a temperatura do ar não significativa estatisticamente para a variação da concentração do material particulado. Os elementos meteorológicos apresentam correlação inversamente proporcional à concentração do material particulado.

Muitos dos estudos da qualidade do ar relacionam seus efeitos com a saúde pública, dentre esses se destacam abordagens para São Paulo (BRAGA et al., 2001; GOUVEA et al., 2004) e para o Rio de Janeiro (DAUMAS et al., 2004; OLIVERIA; FERREIRA, 2007).

Daumas et al. (2004) em estudo realizado na RMRJ relacionaram os efeitos da poluição do ar a saúde da população para o período de setembro de 2000 a agosto de 2002. Os resultados evidenciaram que o principal poluente associado com a mortalidade e morbidade de idosos e crianças por doenças respiratórias na região são as partículas inaláveis (PM₁₀). Os resultados mostram ainda uma associação significativa entre as concentrações de PM₁₀, SO₂ e CO e as internações por doenças do aparelho respiratório para o mesmo dia, e a mortalidade com defasagem de um a três dias, em idosos e em crianças até 5 anos de idade, em particular, no aumento das internações hospitalares por asma.

Gouvea et al. (2006) analisaram a associação entre a exposição à poluição do ar e as admissões hospitalares na cidade de São Paulo. Os autores realizaram uma análise das séries temporais de internações hospitalares por doenças respiratórias e cardiovasculares em crianças e idosos em relação aos níveis de poluição do ar diários. Estes resultados mostraram que todos os poluentes atmosféricos analisados, exceto o ozônio, apresentaram um aumento estatisticamente significativo associado com as internações por doenças respiratórias e doenças cardiovasculares. Um aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ no $\text{PM}_{2,5}$ foi associado a um aumento de 4,6% nas admissões de asma em crianças, um aumento de 4,3% nas admissões de doença pulmonar obstrutiva crônica e 1,5% para doenças isquêmicas do coração em idosos. Estas associações são consistentes com estudos na área da saúde pública e indicam que o atual os níveis de poluição do ar em São Paulo tem um impacto negativo importante sobre a população de saúde.

2.3. Ilha de calor e poluentes atmosféricos

No contexto de estudos que analisaram a possível existência de um feedback entre a ICU e a concentração de poluentes, mesmo sendo um número não muito expressivo, destacam-se o trabalho de Vukovich et al. (1979) que através de um estudo de caso analisaram a variação diurna da circulação da ICU e as associações da distribuição do ozônio na região de St. Louis, Missouri. Os resultados mostraram que durante o dia, uma ICU de cerca de $1\text{-}2^\circ\text{C}$ foi estabelecida com uma circulação associada à ICU. Além disso, nesse período, altas concentrações de O_3 foram observadas na zona da convergência associada com a circulação da ICU imediatamente a favor do vento (na direção do vento) na região do centro da cidade. No período da noite, essa circulação se dissipou em decorrência do desenvolvimento de uma inversão térmica na base da Camada Limite e, com a circulação da ICU dissipada, a alta concentração de O_3 foi deslocada para regiões a favor do vento.

Freitas (2003) através da análise de dados observados e uso da simulação numérica com o RAMS identificou a relação entre a ICU e a

concentração de apenas dois poluentes. Os poluentes adotados foram o PM10 e CO, por se tratarem de poluentes com tempo de vida relativamente altos e, em primeira aproximação, considerados inertes na atmosfera. Na análise da evolução temporal da ICU e PM10, observou-se qualitativamente a existência de uma relação em fase entre os máximos de ICU e a concentração de PM10. Na maioria das vezes, quando a ilha de calor foi mais intensa houve um aumento na concentração desse poluente, entretanto, evidenciou-se que essa relação só pareceu existir entre os máximos. Na análise entre a evolução temporal da ICU e das concentrações de CO, observou-se uma relação com a fase dos máximos, semelhante à obtida para o PM10. Uma comparação quantitativa entre as concentrações e os índices foi realizada através do cálculo das correlações entre essas variáveis. Os resultados apresentados mostraram correlações baixas, porém, ficaram evidentes que existe uma relação positiva com os máximos de concentração e a intensidade da ilha de calor. Altos valores de ICU correspondem a altas concentrações de ambos os poluentes. Portanto, no estudo de Freitas (2003), as análises dos dados evidenciaram que durante eventos intensos de ilha de calor, as concentrações de poluentes (PM10 e CO) são maiores.

Sarrat et al. (2007) analisaram o impacto da superfície urbana na distribuição espacial dos poluentes atmosféricos sobre a região de Paris. O período de análise foi marcado pela presença de uma intensa ICU. Os resultados mostraram que os efeitos urbanos, bem como a meteorologia urbana, têm um importante impacto nos poluentes primários e secundários, mais especificamente o O₃ e NO_x. A distribuição e a concentração dos poluentes são significativamente alteradas na área urbana, principalmente em decorrência da turbulência acentuada.

Lai e Cheng (2009) analisaram associação entre a ICU e a qualidade do ar sobre diferentes padrões sinóticos na metrópole de Taichung, em Taiwan. Os resultados demonstraram que certos padrões sinóticos pioravam a qualidade do ar e induziam a ICU. A ocorrência da ICU era

mais significativa em condições sinóticas cujos ventos eram fracos e com direções bem estabelecidas. Sobre esses mesmos padrões de tempo, a concentrações dos poluentes como NO_2 , CO_2 e CO , aumentaram significativamente com a intensidade da ICU. A convergência do vento associada à circulação da ICU causa um acúmulo dos precursores do O_3 , bem como, outros poluentes, de modo que agrave a qualidade do ar ao longo do tempo e também durante os dias subsequentes.

Agarwal e Tandon (2010) através de um modelo matemático bidimensional avaliaram a dispersão de poluentes sobre o efeito da ICU. Os efeitos de circulação de mesoescala, incluindo as circulações de brisas geradas na ICU, foram tratados no modelo, além dos processos de deposição seca e úmida. Estes resultados mostraram que a circulação de mesoescala produzido pela ICU (brisa urbana) ajudam os poluentes a circularem e moverem-se na atmosfera, tornando, assim, o problema da poluição do ar mais grave em áreas urbanas. A análise do modelo proposto levou a concluir que o nível de concentração de poluentes foi agravado sob o predomínio da ICU em todas as condições atmosférica (instável, neutra e estável), mas, no entanto, verificou-se que houve um aumento da concentração de poluentes quando se aumenta a estabilidade da atmosfera. De um modo geral, a concentração de poluentes é maior para caso de atmosfera estável e menor para o caso de atmosfera instável.

Fallmann et al. (2015) realizou um estudo de cenários para uma cidade da Europa a fim de analisar a relação entre a ICU e a qualidade do ar. O objetivo deste estudo foi demonstrar como diferentes cenários de mitigação da ICU como superfícies com altas refletividades e áreas verdes podem impactar a qualidade do ar. Estes resultados mostraram que o efeito da ICU pode ser substancialmente reduzido quando se altera o albedo de superfícies do telhado, enquanto que o efeito de área verde tem um menor impacto. Com relação aos efeitos dessas estratégias de mitigação sobre a composição química da atmosfera urbana foi evidenciado que o aumento da refletividade da superfície de telhado resulta numa redução

líquida da concentração de ozônio, já que a formação de ozônio é altamente correlacionada com a temperatura. No que diz respeito aos poluentes primários, as concentrações de NO, CO e PM10 mostraram uma tendência de aumento quando se aumenta a refletividade da superfície. Este efeito pode ser atribuído a uma redução do movimento turbulento, convecção e uma diminuição da altura da camada limite, juntamente com as temperaturas mais baixas na camada de dossel urbano devido ao aumento da refletividade.

3 ANÁLISE CLIMATOLÓGICA: ICU E POLUENTES ATMOSFÉRICOS

3.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada para a área de estudo a análise das características climáticas do fenômeno da ilha de calor urbana e dos poluentes atmosféricos, com a determinação dos principais padrões de variabilidade temporal e espacial. As descrições da base de dados observados e das técnicas estatísticas de análise também são apresentadas.

3.2. Material

3.2.1. Caracterização da área de enfoque

Com o intuito de uma análise mais exata e apropriada da identificação dos efeitos de interação da ilha de calor e o comportamento dos poluentes atmosféricos, como área de estudo utilizou-se o maior conglomerado urbano da América do Sul, localizado na região sudeste do Brasil (Figura 3.1, à esquerda): a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

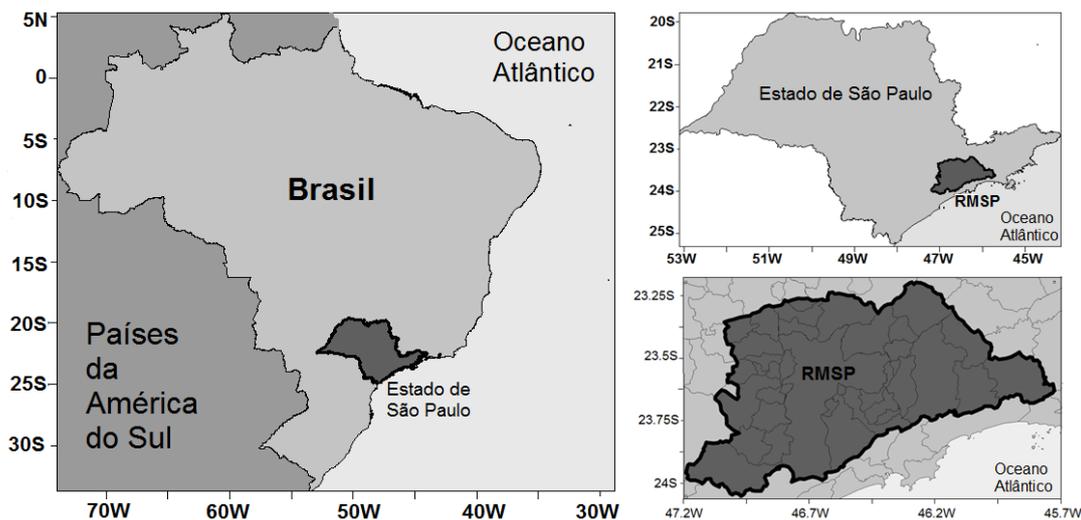


Figura 3.1 - À esquerda, a localização geográfica do Estado de São Paulo no Brasil. À direita, na parte superior e na parte inferior, a RMSP localizada no estado de São Paulo e a RMSP vista de forma ampliada, respectivamente.

A RMSP é composta por 39 cidades (Figura 3.1, à direita) sendo o maior polo de riqueza nacional e a sexta maior cidade do mundo, ocupando uma área de 7944 km², com uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes (IBGE/2011).

A RMSP tem uma topografia dominada por colinas que variam entre 650 e 1200m de altura (Figura 3.2), dentre estas se destacam aa Serra da Mantiqueira e Serra da Cantareira nos limites norte e a Serra do Mar sul do município, respectivamente, e o Pico do Jaraguá (extremo oeste da Serra da Cantareira). O oceano Atlântico encontra-se em média a cerca de 55 km de distância do centro da capital de São Paulo. A topografia associada à proximidade do oceano e a intensa urbanização influenciam significativamente o padrão da circulação atmosférica, criando condições peculiares na RMSP.

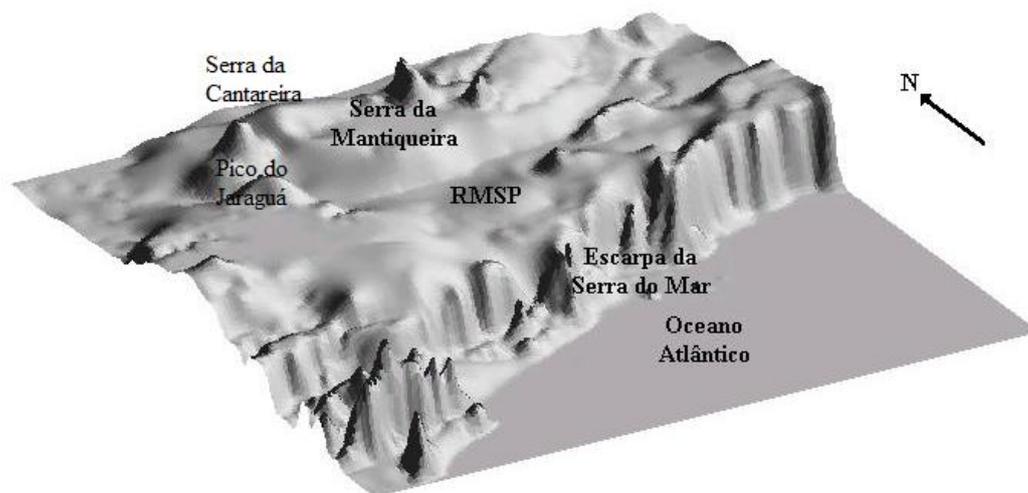


Figura 3.2 - Visão tridimensional da RMSP, com Serra da Mantiqueira, da Cantareira, Serra do Mar e parte do litoral Paulista.
Fonte: Adaptado de Freitas (2003).

A taxa de crescimento populacional na RMSP entre o período de 1980 a 2010 foi de 56% (Figura 3.3), em 1980 o número de habitantes na RMSP era de cerca de quase 12 milhões e em 2010 passou a ter quase cerca de 20 milhões de habitantes (IBGE/2010), em julho de 2014, a população, segundo estimativa, era de 21 milhões de habitantes.

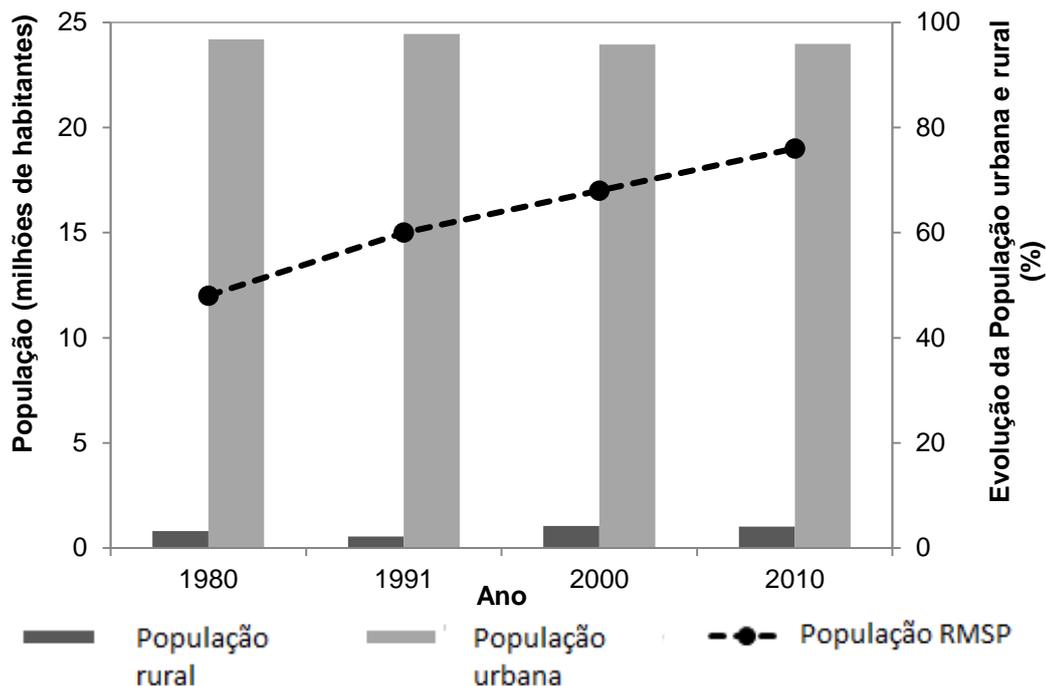


Figura 3.3 - Número de habitantes na RMSP e evolução percentual da população urbana e rural.
 Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Censo Demográfico de 1980, 1991, 2000 e 2010).

O crescimento populacional desencadeou uma expansão da mancha urbana de forma acelerada. Entre 1962 e 2002, a área urbana da RMSP passou de 874 km² para 2.209 km². A expansão urbana da RMSP para o período de 1881-2002 pode ser observada na Figura 3.4.

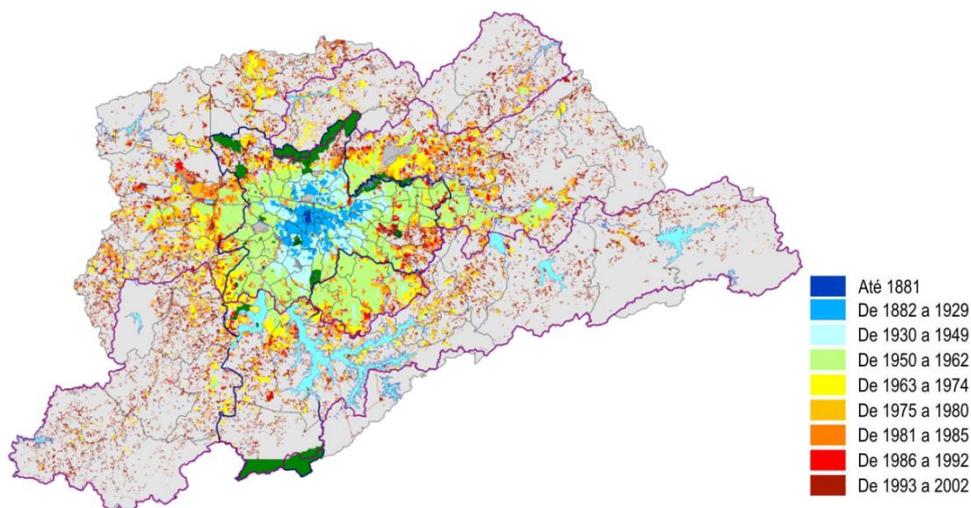


Figura 3.4 - Expansão urbana da RMSP.
 Fonte: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA).

Este rápido crescimento e urbanização não planejados provoca uma série de alterações nas características da superfície, como mudanças do tipo de paisagem natural de uma região e mudanças na dinâmica e termodinâmica no padrão da atmosfera, como por exemplo, a modificação dos fluxos de energia na superfície, o que conduz a modificações no padrão de temperatura de uma região (Figura 3.5). As mudanças no ambiente original causam uma distribuição heterogênea da temperatura na RMSP com regiões de núcleos mais quentes e outras mais frias, logo, ocasionando o surgimento de vários microclimas na RMSP.

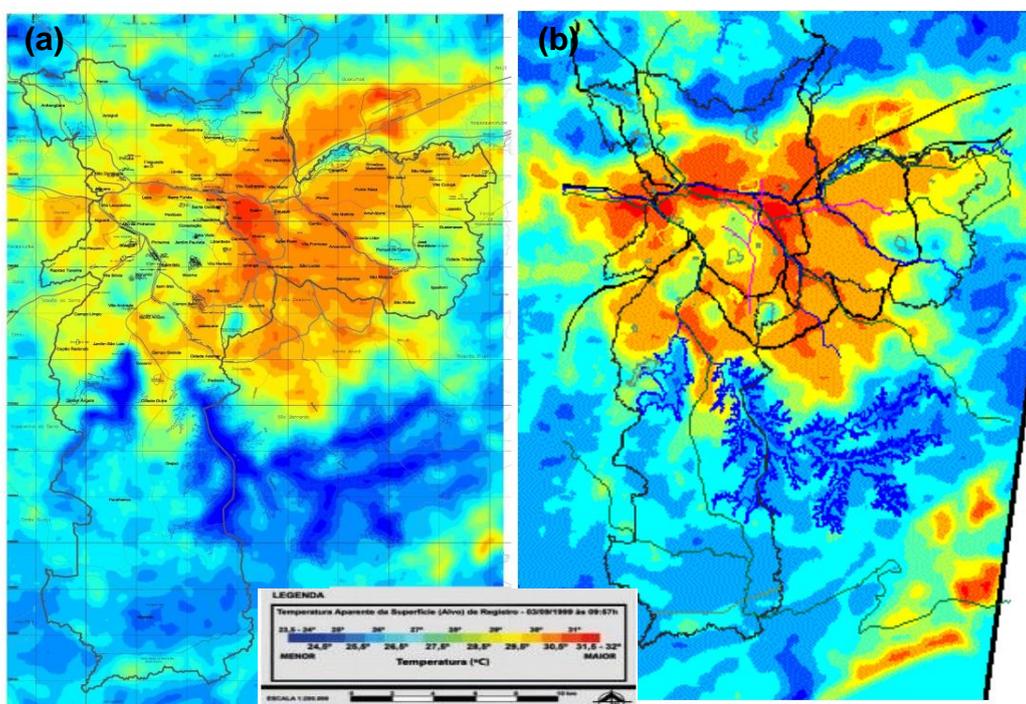


Figura 3.5 – Distribuição espacial da temperatura aparente da superfície na RMSP inferida pelo Satélite Landsat 7 para: (a) dia 03/09/1999 às 09:57 Horário Local (HL) e (b) dia 30/04/2000 aproximadamente às 10:00HL.

Fonte: Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente – Atlas Ambiental de São Paulo - Prefeitura de São Paulo <http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/mapas/105.pdf>.

3.2.2. Base de dados observados

A base de dados é composta pelas observações obtidas a partir das estações meteorológicas e de monitoramento da qualidade do ar que estão instaladas na RMSP.

3.2.2.1. Dados meteorológicos

Na RMSP foram usadas um total de 9 estações meteorológicas, incluindo estações convencionais de aeródromos (Código METAR) e estações automáticas de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Universidade de São Paulo (USP), da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do governo paulista, como listadas na Tabela 3.1 e ilustradas na Figura 3.6. No entanto, essas estações meteorológicas não cobrem toda a RMSP e não estão distribuídas homogeneamente. Assim, a área de estudo foi reduzida para uma região menor, de modo que fosse possível haver a representatividade das observações na região. A área cinza escuro na Figura 3.6 ilustra a área efetivamente analisada neste estudo.

Tabela 3.1- Informações das estações meteorológicas da RMSP.

Nº	Nome	Município	Indicador	Lon/Lat (°)	Altitude (m)	Fonte
1	Ibirapuera	São Paulo	-	46°39' W 23°35' S	750	CETESB
2	Aeroporto de Congonhas	São Paulo	SBSP (83780)	46°39' W 23°37' S	802	REDEMET
3	Taboão da Serra	Taboão da Serra	-	46°45' W 23°36' S	744	CETESB
4	Pinheiros	São Paulo	-	46°42' W 23°33' S	722	CETESB
5	Mirante de Santana	São Paulo	-	46°37' W 23°28' S	786	INMET
6	Aeroporto Governador André Franco Montoro (Guarulhos)	Guarulhos	SBGR (83778)	46°28' W 23°26' S	750	REDEMET
7	São Caetano do Sul	São Caetano do Sul	-	46°33' W 23°37' S	754	CETESB
8	Água Funda	São Paulo	83004	46°37' W 23°39' S	799	USP
9	Parelheiros	Parelheiros	-	46°38' W 23°47' S	772	CETESB

Fontes: REDEMET - www.redemet.aer.mil.br, USP - www.estacao.iag.usp.br, CETESB - www.cetesb.sp.gov.br e INMET - www.inmet.gov.br.

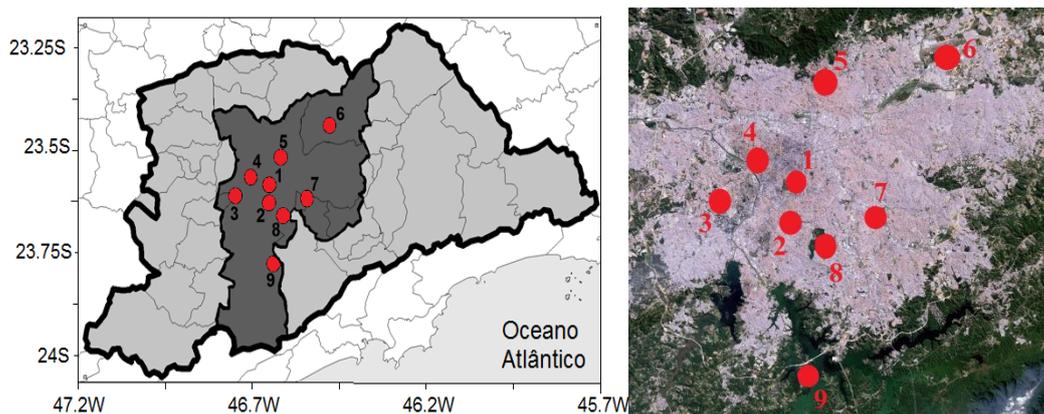


Figura 3.6 - Mapa da RMSP com as estações meteorológicas, sendo (1) Parque do Ibirapuera, (2) Aeroporto de Congonhas, (3) Taboão da Serra, (4) Pinheiros, (5) Mirante de Santana, (6) Aeroporto de Guarulhos, (7) São Caetano do Sul, (8) Água Funda e (9) Parelheiros. Na figura do lado esquerdo, a área cinza escura destaca a nova delimitação dos mapas que demarca a RMSP efetiva que foi utilizada no presente estudo. Do lado direito, localização das estações da RMSP sobre uma imagem de uso do solo.

A base de dados compreende 10 anos de observações de dados de temperatura do ar distribuídos hora a hora entre 2002 e 2011, um total de aproximadamente 87.600 pontos de dados por estação. O conjunto de dados compreendem 788.400 pontos de dados por hora, em que cerca de 244.402 (31%) são dados faltosos. Nenhum método estatístico foi utilizado para preencher as lacunas dos dados faltantes no conjunto de dados, uma vez que o número destas falhas não foi significativo quando comparado com o tamanho total do conjunto de dados.

3.2.2.2. Dados de qualidade do ar

Os poluentes que serão analisados neste estudo incluem: ozônio (O_3), óxidos de nitrogênio (NO_x), partículas inaláveis (PM_{10}) e monóxido de carbono (CO).

Na RMSP, a rede de estações de monitoramento da qualidade do ar é de responsabilidade da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Na Tabela 3.2 e na Figura 3.7 são apresentadas as 15 estações que foram utilizadas.

Tabela 3.2 - Parâmetros de qualidade do ar monitorados na RMSP.

Estação		Parâmetros Monitorados			
		PM ₁₀	NO _x	CO	O ₃
1	Cerqueira César	X	X	X	
2	Congonhas	X	X	X	
3	Ibirapuera	X	X	X	X
4	IPEN – USP		X	X	X
5	Moóca	X		X	X
6	Nossa Senhora do Ó	X			X
7	Parque D. Pedro II	X	X	X	X
8	Pinheiros	X	X	X	X
9	Santana	X			X
10	Diadema	X			X
11	Mauá	X	X		X
12	S. André - Capuava	X			X
13	S. Caetano do Sul	X	X	X	X
14	Taboão da Serra	X	X	X	
15	Parelheiros	X	X	X	

Fonte: CETESB - www.cetesb.sp.gov.br.

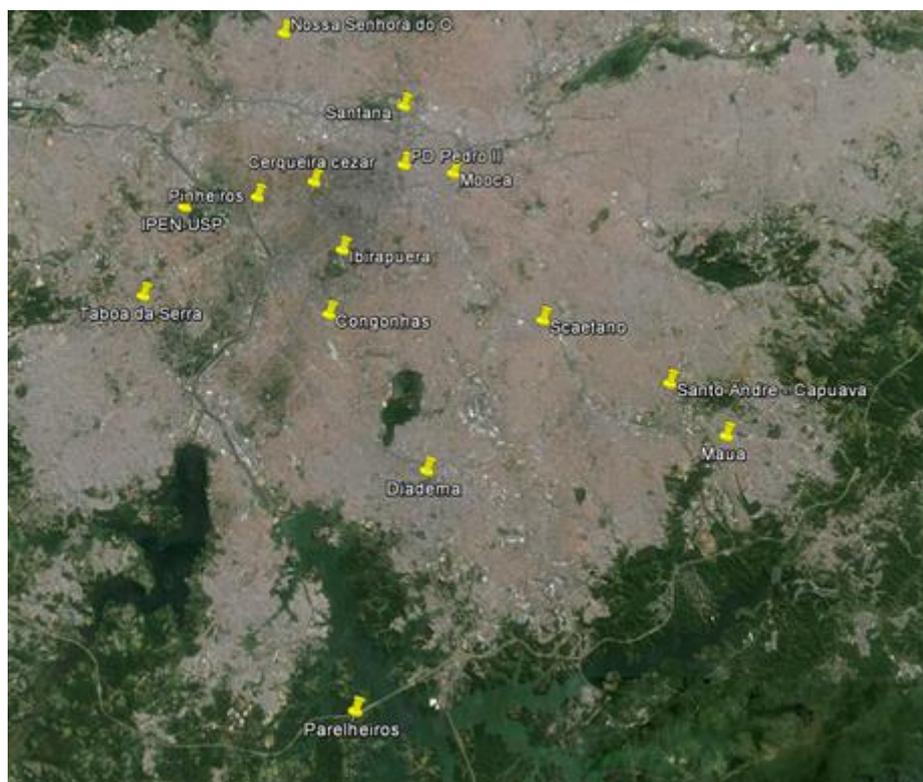


Figura 3.7 - Distribuição espacial das estações de monitoramento de qualidade do ar na RMSP de acordo com a Tabela 3.2.

Os números totais representativo da base de dados de qualidade do ar dependem dos poluentes que foram utilizados, ocasionando variação no total de dados por estação. Para o NO_x, de um número total de 876.000 pontos de dados por estação, o conjunto de dados existentes compreendeu 566.978 pontos de dados por hora (65%), havendo falta de cerca de 309.022 (35%) dos dados. Para o PM₁₀, de um número total de 1.314.000 pontos de dados por estação, o conjunto de dados existentes compreendeu 1.019.105 pontos de dados por hora (78%) com cerca de 294.895 (22%) dos dados faltosos. Para o CO, de um número total de 963.600 pontos de dados por estação, o conjunto de dados existentes compreendeu 647.149 pontos de dados por hora (67%) com cerca de 316.451 (33%) dos dados ausentes. Enquanto, para o O₃, de um número total de 1.138.800 pontos de dados por estação, o conjunto de dados existentes compreendeu 749.336 pontos de dados por hora (66%). Neste, o total de dados faltantes foi de cerca de 389.464 (34%).

3.3. Métodos

3.3.1. Análise de Função Ortogonal Empírica

A análise das Funções Ortogonais Empíricas (EOF- *Empirical orthogonal Function*), também denominadas de Análises de Componentes Principais (PCA - Principal Component Analysis), foi utilizada para investigar a variabilidade espacial e temporal da ICU na RMSP. A técnica de EOF é uma das técnicas estatísticas de análise multivariada mais conhecida e, possivelmente, a mais utilizada nas ciências atmosféricas e se tornou umas das técnicas mais populares após estudos meteorológicos realizados por Lorenz (1956).

Esse método tem por objetivo transformar variáveis originais correlacionadas (K) em novas componentes/variáveis não correlacionadas ou ortogonais (M). Essas novas componentes são chamadas de fatores ou índices. Essas componentes são funções lineares das componentes originais. Portanto, para um vetor x com

múltiplas observações de dados ($K \times 1$), a EOF gera um novo vetor u de ($M \times 1$), que inclui elementos que são combinações lineares dos elementos do vetor x e contêm a maior parte da informação do vetor original. Os elementos deste novo vetor representam a máxima fração da variabilidade nos dados originais e são chamados componentes principais – PCs (WILKS, 2006).

Cada PC gerada pela EOF representa uma porção da variabilidade dos conjunto de dados, de modo que, quanto maior for a variância explicada pela componente, maior é a sua importância na representação do conjunto de dados. O primeiro modo ou primeira PC é a combinação linear das variáveis originais padronizados, representando a fração ou porcentagem da máxima variância. O segundo modo ou segunda PC é a componente principal ou a combinação linear das variáveis que não estão correlacionadas com o primeiro modo, e representa a maior parte da variância remanescente. Os componentes principais subsequentes são combinações lineares com a maior parte da variância restante, e eles não estão correlacionados com as componentes principais que têm índices mais baixos. Assim, a principal vantagem de utilizar a técnica de EOF é que a máxima variância pode ser explicada pela classificação dos autovetores associados com os maiores autovalores da matriz de correlação (PREISENDORFER, 1988).

Neste estudo, a técnica de EOF foi empregada para analisar os dados de temperatura média horária durante o período de 10 anos de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A temperatura média espacial na RMSP foi subtraída da temperatura em cada estação. Portanto, combinações lineares das anomalias de temperatura do ar ($T' = T - \bar{T}$) foram usadas para calcular as PCs.

A EOF pode ser baseada na análise da matriz de correlação ou da matriz covariância. Neste estudo, optou-se por utilizar a matriz de correlação obtida a partir da matriz $[Z]$ de anomalias normalizadas ($n \times K$), onde K é o número de variáveis em análise (anomalias de temperatura) e n é

número de observações em cada estação. A matriz de correlação é dada por:

$$R = \frac{1}{n-1} [Z]^T [Z] \quad (3.1)$$

Onde $[Z]^T$ é a matriz transposta de Z. A matriz correlação [R] é obtida pelos M autovalores λ_m ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$) e cada autovalores corresponde a um autovetor (e_m^T):

$$e_m^T = [e_{1m}, e_{2m}, \dots, e_{km}], \quad m=1,2,3,\dots,M \quad (3.2)$$

Cada autovetor é um dos M componentes da nova base ortogonal usada. As novas variáveis ou componentes principais (PCs) são obtidas pela projeção dos dados originais sobre a nova base de dados pelos autovetores [R]:

$$u_{m=e_m^T} [Z] = \sum_{k=1}^K e_{k,m} Z_k, \quad m=1,2,3,\dots,M \quad (3.3)$$

Cada um dos M autovetores contém um elemento pertencente a cada uma das K variáveis e podem ser representados num mapa que indica a localização com as maiores contribuições da sua componente principal e quais as anomalias simultâneas que são representadas por esta componente principal.

Outra informação importante fornecida pela EOF é a variância total da análise, que é definida pelo somatório das variâncias das variáveis observadas, dada por:

$$V = \sum_{k=1}^K S_{k,k} = \sum_{k=1}^K \lambda_m \quad (3.4)$$

O valor da variância explicada por cada componente é dada por:

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \cdot 100\% = \frac{\lambda_m}{\sum_{k=1}^K S_{k,k}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Uma questão importante sobre a EOF refere-se sobre ao número de autovalores que deve ser retido a fim de diferenciar e separar o que é informação significativa do que é ruído. Para escolher um número apropriado de PCs para análise é aplicado o critério de truncamento de Kaiser que consiste em reter o λ_m que satisfaz o critério:

$$\lambda_m \geq \frac{T}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,k} \quad (3.6)$$

Onde $s_{k,k}$ é variância da amostra do k^{th} elemento e T é um parâmetro de limite. O critério de Kaiser usa Equação 6 como um parâmetro limite $T = 1$ (WILKS, 2006). Neste critério, autovalores superiores a um são considerados os mais significativos.

A fim de maximizar a variância dos resultados foi usado a EOF rotacionada pelo método de rotação ortogonal chamado de VARIMAX (KAISER, 1958). A rotação VARIMAX é uma aproximação comumente usada, e é determinada pela escolha dos elementos da matriz de rotação para maximizar, como se segue:

$$V^* = \frac{[n \sum_{i=1}^n (a_{i,j}^2)^2 - (\sum_{i=1}^n a_{i,j}^2)^2]}{n^2}, j=1, \dots, r \quad (3.7)$$

Onde n é o número de variáveis, r é o número de PCs e b_i são os autovetores. A EOF rotacionada tem a vantagem de produzir novos padrões compactos que podem ser usados para a regionalização, ou seja, separa a área em um número limitado de subáreas homogêneas (HANNACHI et al., 2007). Os principais objetivos da análise de EOF rotacionada são atenuar as fortes restrições da EOF (isto é, variáveis ortogonais/não-correlacionadas da PCs), suavizar a dependência do padrão da EOF com a forma do domínio e obter estruturas simples e de fácil interpretação dos padrões obtidos.

Dependendo de quais os parâmetros são escolhidos e selecionados para análise, as variáveis da EOF podem ser especificadas com diferentes modos de decomposição. Para se obter um padrão de anomalia espacial

é usado a aproximação do modo-T e para definir a tendência temporal e variabilidade dos pontos da grade é utilizado aproximação do modo-S (CATTELL, 1952; GREEN, 1978; RICHMAN, 1983). Ambos os modos, modo-T e modo-S foram analisados neste estudo para identificar as características do padrão espacial e temporal e os campos de anomalia de temperatura do ar, respectivamente.

Na aproximação do modo-T, os campos espaciais (num dado tempo) da variável usada na análise são consideradas como variáveis estatísticas. O domínio é o tempo e as observações estatísticas são os diferentes pontos espaciais incluído num campo instantâneo (SALLES et al, 2001). Portanto, o modo-T não identifica apenas os principais padrões espaciais do campo de anomalia de temperatura, mas também sua ordem de ocorrência ao longo do período de estudo.

Para a análise do modo-T, uma matriz de dados ($n \times m$) foi construída, onde n correspondem ao campo espacial ou "instantâneo" das anomalias de temperatura média horária ($n = 9$, que são estações meteorológicas da RMSP) e m correspondente as observações estatísticas ($m = 24$, que são as anomalias de temperatura média horária dos 10 anos de observação).

No modo-T, os padrões espaciais (*PC scores*) correspondem os principais tipos de anomalias de temperatura que descrevem a variabilidade espacial observada, enquanto a série temporal (*PC loading*) representa a correlação entre os padrões espaciais e cada um dos campos de anomalia média horária. As séries temporais associadas mostram quando um padrão específico ocorre e quão importante é a sua contribuição para o campo real em um determinado momento. A variância explicada por cada componente determina o grau de significância de cada modo espacial no domínio temporal. Portanto, quando a série temporal apresenta valores baixos (baixos *PC loadings*) num tempo específico, o padrão espacial não corresponde à estrutura do campo de anomalia de temperatura naquele dado momento. Assim, valores próximos a 1 na série temporal representam sequências de condições de tempo similares às sequências dos padrões obtidos (HARMAN, 1976; CATTELL, 1978).

No modo-S, as variáveis estatísticas são pontos no espaço, e as observações estatísticas são os tempos de observação no qual as variáveis são medidas; assim, este modo pode ser utilizado para estudar o comportamento da série temporal. O objetivo do modo-S é isolar os subconjuntos no domínio espacial que possuem variações temporais semelhantes e identificar regiões com comportamentos homogêneos ou quase homogêneos no tempo (COMPAGNUCCI et al., 2001). No entanto, esta análise não permitem a determinação das características espaciais do campo em estudo, nem a recorrência de tais padrões espaciais. Portanto, no modo-S são identificados as principais características da variabilidade temporal de campo e as áreas de influência destes modos.

Para a análise do modo-S, uma matriz de dados ($n \times m$) foi construída, onde n é o número de variáveis ($n = 24$, que é as anomalias de temperatura média horárias dos 10 anos de observação) e m correspondentes ao número de observações ($m = 9$, que é de 9 estações meteorológicas da RMSP).

Na aproximação do modo-S, a série temporal (*PC scores*) corresponde os principais padrões de variabilidade temporal da anomalia de temperatura, e os padrões espaciais (*PC loadings*) representam os campos de correlação determinados pela série temporal e todos os pontos do domínio espacial. O campo de padrão espacial mostram áreas onde os pontos de grade das séries temporais apresentam um comportamento temporal em fase ou anti-fase similares ao da série temporal (COMPAGNUCCI et al., 2001), de tal forma que baixos valores de correlação (baixos *PC loadings*) não correspondem ao comportamento original das observações para esse modo particular. Portanto, correlação significativa nos mapas espaciais (*PC loadings*) representa regiões onde uma determinada série temporal é significativa (SALLES et al., 2001).

As aproximações de modo-T e de modo-S das EOF's descrevem diferentes aspectos do mesmo caso real. Contudo, estes dois modos são complementares e igualmente exclusivos porque seus resultados não podem ser reproduzidos pela manipulação matemática um do outro. Em

certos casos especiais, o modo-S e modo-T podem produzir resultados que são aparentemente semelhantes, e uma relação pode ser observada entre as “similaridades” se existe uma grande relação intrínseca e linear entre o espaço e tempo, o que impede quaisquer outros efeitos, tais como a dispersão, que ocorre ao longo do tempo, devido a não linearidade dos sistemas reais (COMPAGNUCCI et al., 2001; SALLES et al., 2001).

Neste estudo, para cada PCs analisada pelo modo-S foram elaborados gráficos temporais (*PC scores*) que são tipos adimensionais da série temporal que descreve os principais tipos de variabilidade no tempo da anomalia de temperatura e mapas espaciais dos principais fatores comuns (*PC loading*) que mostram as regiões onde a serie temporal é representativa do comportamento temporal da anomalia de temperatura, ou seja, campo de correlação determinada pela serie temporal da PC em todos os pontos do domínio. Para cada PCs analisada pelo modo-T foram elaborados gráficos das séries temporais (*PC loadings*) que representam a correlação entre o padrão espacial PC e cada campo de anomalia de temperatura média horária e mapas espaciais dos principais fatores comuns (*PC scores*) que são tipos adimensionais e os quais mostram os principais tipos de anomalia.

3.3.2. Análise de Cluster

Com o intuito de completar a análise de EOF, foi aplicado a Análise de Cluster – AC (*Cluster Analysis*) ou também conhecida como análise de agrupamento. A Análise de Cluster e análise de EOF são ferramentas úteis e hábeis para verificar como as amostras estão relacionadas através da determinação do nível de semelhança com variáveis específicas (VICINI; SOUZA, 2005). O mesmo conjunto de dados utilizado na análise de EOF foi empregado na AC, portanto, dados de anomalia de temperatura média horária para o período de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.

A análise de cluster é usada para identificar e classificar objetos/indivíduos baseados em suas características e obter grupos

semelhantes. Esta análise utiliza critérios de seleção pré-determinados para classificar objetos de acordo com as similaridades dos elementos para aqueles dentro de outros grupos.

Na AC, o grau de similaridades e diferença entre as observações individuais, x , é usado para definir os grupos e atribuir membros do grupo. Para um vetor de dados x , que é definido pelos dados ($n \times k$) de uma matriz $[X]$, um esquema de classificação irá definir G grupos e determinará os membros do grupo em diferentes níveis de agregação.

A AC fundamentalmente consiste de uma função de agrupamento (chamado de medida de similaridade ou distância) e um critério de agrupamento matemático (EVERITT, 1993). A composição de um cluster é baseada nas medidas de distâncias; assim, ele é composto de pontos separados por pequenas distâncias relativas às distâncias entre os agrupamentos (WILKS, 2006). A medida de similaridade mais comumente utilizada na AC é a Distância Euclidiana na dimensão espacial dos vetores de dados, e esta abordagem foi utilizada aqui. Uma discussão detalhada de várias medidas de similaridade pode ser encontrada em Duran e Odell (1974).

A Distância Euclidiana entre os dois vetores x_i and x_j é dado pela (Equação 3.8):

$$d_{i,j} = [x_i - x_j] = \left[\sum_{k=1}^K (x_{i,k} - x_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

Depois de selecionar uma medida de distância para quantificar a dissimilaridade ou de similaridade entre o par de vetores x_i e x_j , o próximo passo na AC é escolher um método ou critério de agrupamento. Os processos de agrupamento podem ser divididos em processos hierárquicos ou não hierárquicos, sendo os processos hierárquicos mais comumente usados. O método de aglomeração hierárquico é caracterizado pela criação de um conjunto de grupos em uma hierarquia, cada um dos quais é formado pela integração de um par a partir de um

conjunto de grupos previamente definidos. O método hierárquico utilizado neste estudo foi o método de Ward (1953), que é o método hierárquico mais utilizado. Neste método, o par de grupos a serem incorporados minimiza a soma dos quadrados das distâncias entre os pontos e os centroides dos seus respectivos grupos somados ao longo dos grupos resultantes. Assim, entre todos os métodos possíveis de fusão dois dos grupos $G+1$ para fazer G grupos, a fusão que minimiza W (WILKS, 2006), é mostrada na Equação 3.9:

$$W = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \|x_i - \bar{x}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_{g,k})^2 \quad (3.9)$$

Este método hierárquico para partições minimiza a perda de informações associadas com cada cluster (EVERITT, 1993). Uma das principais vantagens do método de Ward, além da sua eficácia na formação de grupos, é que ele tende a produzir grupos com o mesmo número de elementos.

Os resultados da AC são apresentados por um dendograma ou um diagrama de árvore, onde as sucessivas fusões de indivíduos em um único grupo são verificadas e os resultados são resumidos. Uma das dificuldades da CA é escolher quantos clusters são analisados, para tal, uma fase intermédia deve ser selecionada como a solução final. Assim, um nível de agrupamento deve ser selecionado, de modo que, minimize as diferenças entre os membros de um dado grupo e maximize as diferenças entre os membros de diferentes agrupamentos (WILKS, 2006). Não existem critérios estabelecidos para a seleção de clusters, embora o processo de interrupção requeira uma escolha subjetiva de acordo com os objetivos da análise.

Neste estudo, as regiões homogêneas foram identificadas pela organização dos dados de temperatura em uma matriz ($m \times n$), onde m corresponde às 9 estações e n corresponde às anomalias de temperatura média horária. Deste modo, a AC foi realizada para fornecer uma descrição estatística do padrão de temperatura do ar de cada região,

além de determinar a variabilidade da temperatura e assim ser capaz de avaliar se os padrões meteorológicos ou os fatores locais controlam e influenciam a RMSP.

3.3.3. Intensidade da Ilha de Calor Urbana

Nos estudos da análise da Ilha de Calor Urbana sempre é discutido as suas principais características como o padrão e a estrutura, mas principalmente a intensidade do fenômeno, com a identificação dos horários de maior e menor intensidade. A intensidade de ICU ou IICU na RMSP foi calculada pela diferença da temperatura média horária entre a área urbana/suburbana (T_u) e área rural/vegetada (T_r). Essa definição foi utilizada em muitos estudos, tal como Memon et al. (2009) e Camilloni; Barrucand (2011).

$$IICU = T_u - T_r \quad (3.10)$$

A definição representada na equação (3.10) é considerada como uma aproximação tradicional em que duas estações (uma estação urbana e uma estação rural) são adotadas na análise da IICU. Esta abordagem é tipicamente usada para os casos em que existam poucas estações na área de estudo. No entanto, quando existir apenas uma estação na área urbana e muitas estações nas áreas vizinhas, a IICU é melhor definida pela diferença entre a estação urbana e a média representativa das estações da área rural. Para o caso em que houver muitas estações na área urbana, assim como na área rural, as estações devem ser cuidadosamente selecionadas porque variações significativas ocorrem de uma região para outra, principalmente na região urbana. Neste estudo, as estações adotadas para representar as áreas urbana e rural na análise da IICU serão escolhidas após os resultados da AC.

3.4. Resultados

3.4.1. Caracterização meteorológica

Para o período de 10 anos, de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2011, a temperatura média da RMSP foi de 15°C no mês mais frio e 23°C no mês

mais quente (Figura 3.8). Os meses que compreendem o verão e a primavera são aqueles com os valores mais elevados de radiação solar (média de 180 W/m²) e os meses de inverno, com os menores valores de radiação solar de cerca de 150 W/m². A distribuição espacial média da temperatura do ar na RMSP no período dos 10 anos foi substancialmente uniforme variando de 18 a 20°C.

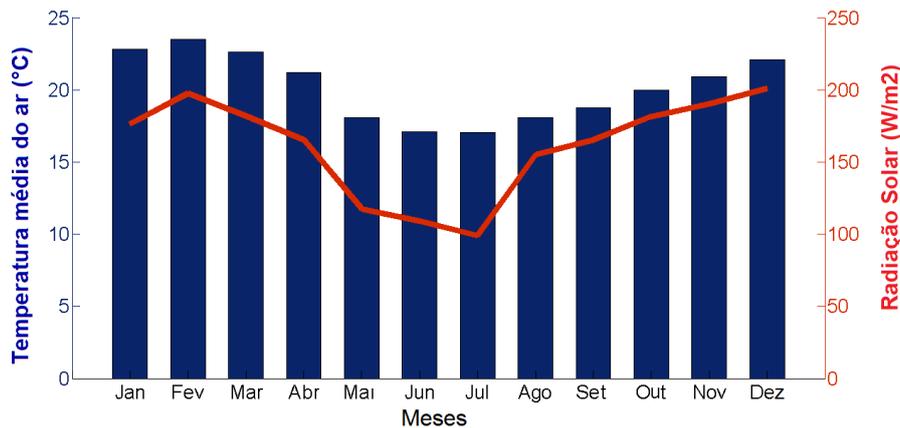


Figura 3.8 – Ciclo anual da temperatura média do ar e a radiação solar incidente para o período de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2011 na RMSP.

O ciclo diurno da temperatura na RMSP apresenta um pico de 25 °C em torno de 13-15HL (Figura 3.8), este pico é principalmente associado com o ciclo de radiação solar, embora também esteja relacionada com um alto nível de liberação de calor antropogênico. Com resfriamento no período noturno, a temperatura caiu para um mínimo de 17°C, em média, entre 05:00-07:00HL. O ciclo diurno da temperatura na RMSP oscila numa amplitude de cerca de 7,6°C.

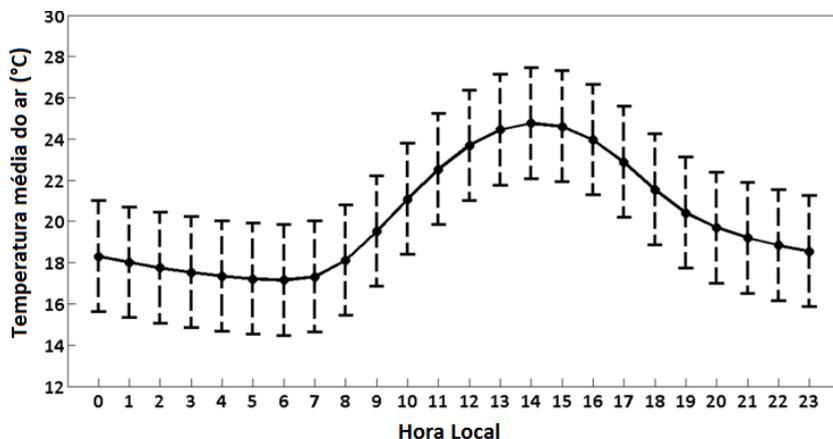


Figura 3.9 - Ciclo diurno da temperatura média do ar para o período de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2011 na RMSP.

Embora a RMSP esteja aproximadamente a 55 km da costa, o regime de vento ao longo do ano é fortemente influenciado pela brisa marítima que prevalece na direção Sul/Sudeste durante o dia, correspondendo à trajetória oceano/continente (Figura 3.10). Além disso, uma componente de Leste é observada durante a maior parte da região, que provavelmente está relacionada ao aquecimento diferencial da superfície e as características locais de superfície, tais como os parques, corpos d'água e os ambientes mais edificadas. A velocidade do vento na RMSP no período de estudo foi tipicamente baixa, variando de 0,5 a 2,1 m/s (Figura 3.10b).

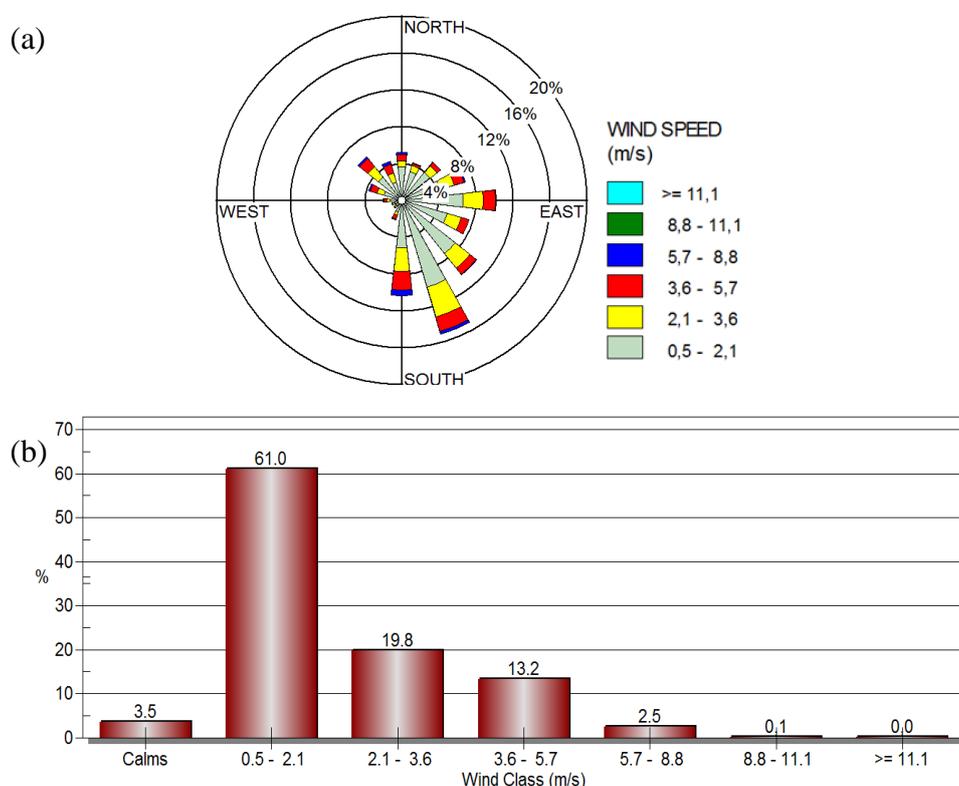


Figura 3.10 - (a) Rosa dos ventos média (direção e intensidade) para o período 2002-2011 e (b) distribuição de frequência de classe da velocidade do vento na RMSP para o período 2002-2011.

Um estudo mais detalhado sobre a caracterização do regime de vento em São Paulo é encontrado em Oliveira e Silva Dias (1982) que caracterizaram a variação diurna e sazonal dos ventos na estação climatológica do IAG-USP. De acordo com o estudo, há a existência de três padrões de entrada da brisa marítima em São Paulo: (i) brisa padrão,

na qual o vento passa de NE, no período da manhã, para SE à tarde; (ii) vento NW no período da manhã passando a SE ou calmaria no período da tarde ou início da noite; (iii) intensificação do componente SE no período diurno. A penetração da brisa marítima em São Paulo para o período por eles analisado, ocorre entre 13 e 14HL na maioria dos casos, podendo haver uma antecipação ou atraso, dependendo da situação sinótica atuante e da estação do ano. Uma caracterização detalhada do regime do vento em cada estação meteorológica utilizada neste estudo é apresentada na Figura 3.11.

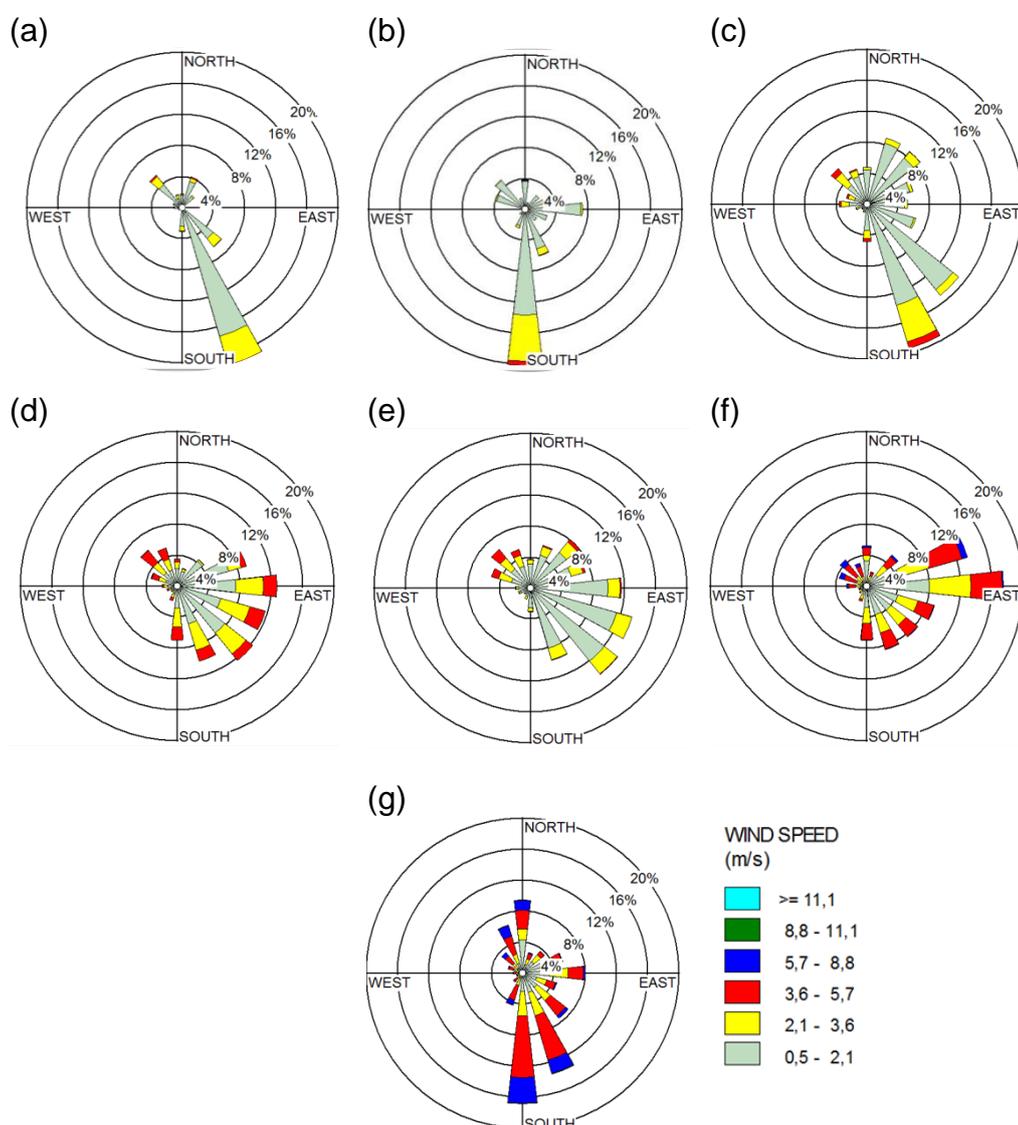


Figura 3.11- (a) Rosa dos ventos (direção e intensidade) para as estações usadas da RMSP para o período 2002-2011: (a) Pinheiros, (b) Ibirapuera, (c) São Caetano do Sul, (d) Mirante de Santana, (e) Água Funda, (f) Guarulhos e (g) Congonhas.

3.4.2. Análise de EOF

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise de EOF para a aproximação do modo-T e a aproximação do modo-S. Com a EOF do modo-T é identificado o padrão espacial das estações. A EOF do modo-T produziu três modos dominantes da variabilidade da temperatura na RMSP, com a primeira, a segunda e a terceira EOF juntas explicando aproximadamente 99% da variância total. O primeiro modo (ou primeira PC score) explica 67% da variância total e tem um claro ciclo diurno. O coeficiente temporal do primeiro modo ou *PC loadings* (Figura 3.12) tem a correlação mais significativa (valores superiores a 0,8) em dois períodos, entre 00:00 a 06:00HL e outro entre 21:00 a 23:00HL, indicando que o período da noite e início da manhã estão sujeitos ao respectivo padrão espacial da Figura 3.13a. A estrutura espacial associada com a primeira PC score (Figura 3.13a) tem um padrão dipolo com valores negativos nas regiões leste, norte e noroeste da RMSP e valores positivos na região sul da RMSP. Este padrão está associado com os mecanismos de circulação da RMSP, sendo a região sul da RMSP fortemente influenciada pela brisa marítima.

A segunda PC Score explica 24% da variância total, com os maiores correlações entre 12:00 - 20:00HL (Figura 3.12). A estrutura espacial da segunda PC score tem um padrão de núcleos negativos e positivos na área central e nas áreas de bordas da RMSP, respectivamente (Figura 3.13b). A comparação do padrão espacial da anomalia de temperatura da segunda PC (Figura 3.13b) com o mapa da temperatura aparente da superfície da RMSP (Figura 3.5) revelou similaridades no comportamento espacial, com regiões de núcleos quente e frio que se coincidem. A região central em direção ao eixo nordeste-sudoeste tem um núcleo mais quente na hora específica em que a imagem foi capturada na Figura 3.5, e esta região coincidiu com a área central da Figura 3.6b. As áreas na Figura 3.5 que mostram núcleos de temperaturas mais frias coincidem com as estações da Figura 3.13b. Portanto, o segundo modo está associado com a urbanização na RMSP e representa a liberação do calor

armazenado no dossel urbano, bem como outras fontes antropogênicas, além do processo de circulação da RMSP. Assim sendo, o segundo modo da EOF é o que melhor representa a ICU na RMSP.

O terceiro modo explica 8% da variância total, e a série temporal da *PC loading* exibe os maiores valores de correlação entre as 07:00 e 11:00HL (Figura 3.12). A estrutura espacial do terceiro modo (Figura 3.13c) é semelhante ao primeiro modo, porque também exibe um comportamento dipolo, embora ela apresente valores positivos nas áreas a sudoeste, a sul e a leste da RMSP e valores negativos nas áreas ao norte e a noroeste da RMSP, além de um núcleo negativo no centro sul da RMSP. A terceira EOF parece estar relacionada com o primeiro modo, e é uma representação complementar dos mecanismos de circulação do vento na RMSP.

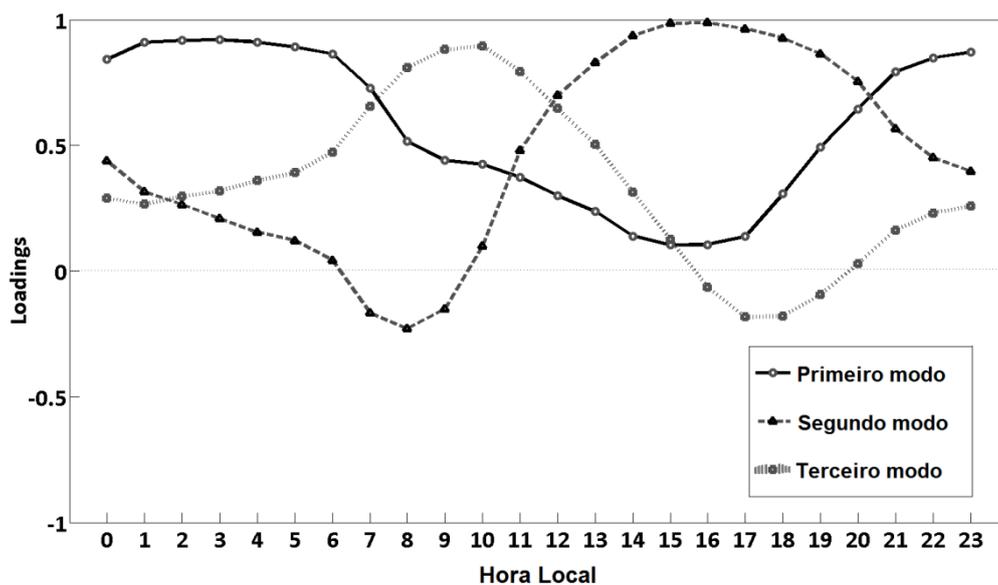


Figura 3.12 - Série temporal (*PC loading*) da primeira (67%), segunda (24%) e terceira (8%) EOF do modo-T calculadas usando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.

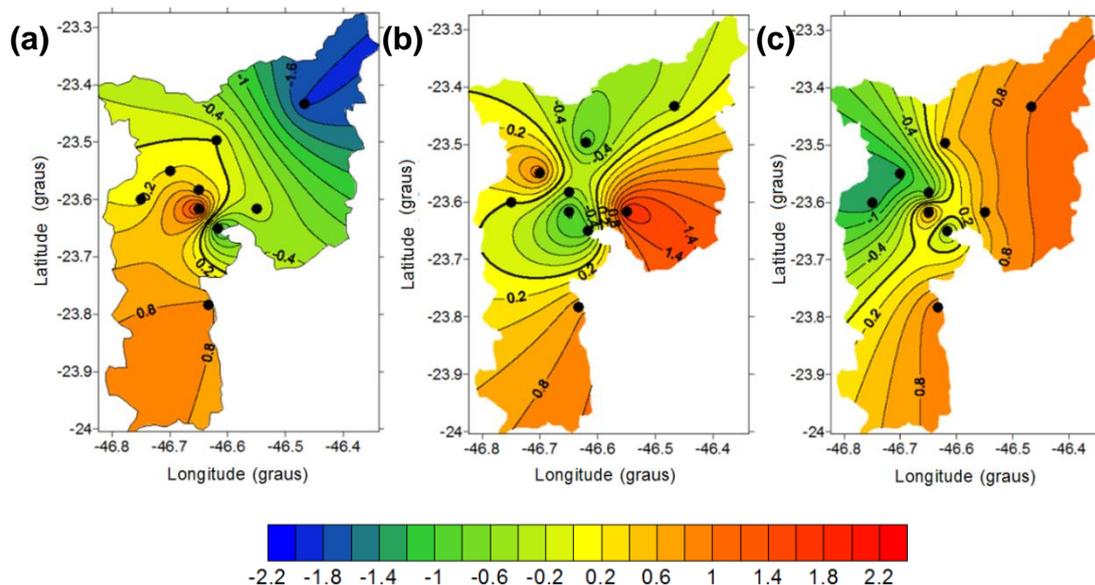


Figura 3.13 - Padrão espacial (*PC score*) da (a) primeira (67%), (b) segunda (24%) e (c) terceira (8%) EOF do modo-T calculadas usando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.

A fim de identificar a variabilidade temporal dos padrões espaciais que foram identificados no modo-T, serão apresentados os resultados da análise da EOF no modo-S. Na EOF da aproximação do modo S, dois modos dominantes de variabilidade foram observados, e juntos explicam cerca de 80% da variância total dos dados. Quando o modo de S é aplicado, o padrão espacial (ou *PC loading*) mostra os campos de correlação da variável em estudo determinados pela série temporal *PC score* e todos os pontos no domínio espacial. O mapa da *PC loading* mostra as regiões onde a série temporal é representativa do comportamento temporal das anomalias de temperatura. As áreas com baixos *PC loading* não correspondem ao comportamento das observações originais para uma PC particular. A série temporal (ou *PC score*) descreve os principais tipos ou padrões da variabilidade temporal para a anomalia de temperatura (COMPAGNUCCI et al., 2001).

O primeiro PC (ou primeiro *PC score*) explica 49% da variância total e tem um ciclo diurno bem marcado (Figura 3.14). As séries temporais destacam os padrões de variabilidade das anomalias de temperatura

durante cada período, com valores positivos entre as 00:00 e as 11:00HL e valores negativos entre as 12:00 e as 23:00HL. O padrão espacial do mapa da primeira *PC loading* (Figura 3.15a) é semelhante a segunda PC da EOF do modo-T (Figura 3.13b), com valores positivos na área central e valores negativos nas bordas da RMSP. Portanto, a EOF do modo-S demonstra que a anomalia da temperatura no centro da RMSP é positivo entre 00:00 e 11:00HL e negativa nos demais horários, enquanto que as áreas na borda da RMSP apresentam comportamentos invertidos, demonstrando que pode haver comportamento diferenciado da anomalia da temperatura na RMSP. Além disso, a primeira PC do modo-S corresponde ao padrão espacial da ICU na RMSP, e é semelhante à segunda PC do modo-T.

O padrão da segunda PC score explica 31% da variância total na temperatura e apresenta um ciclo diurno bem definido (Figura 3.14). O comportamento temporal da segunda PC é semelhante à primeira PC embora adiantada por cerca de 3 horas. A característica dominante da estrutura espacial do mapa da segunda *PC loading* (Figura 3.15b) é uma estrutura positiva no lado oeste da RMSP e negativa no restante da área. Assim, no lado ocidental da RMSP, a anomalia de temperatura é negativa entre 07:00-15:00HL e positiva nos demais horários. No lado leste da RMSP, a anomalia da temperatura é positiva 07:00-15:00HL e negativa no restante do período. Este padrão de dipolo, que também foi observado na primeira e na terceira PC da EOF no modo-T (Figura 3.13a e 3.13c), está associado com a circulação dos ventos na RMSP.

Em resumo, a segunda PC do modo-T e a primeira PC do modo-S representam o padrão espacial da ICU na RMSP, enquanto que a primeira e a terceira PC do modo-T e a segunda PC do modo-S representam o padrão de circulação dos ventos na RMSP. De acordo com Salles (2001), os resultados semelhantes em ambos os modos implica uma relação espacial e temporal linear simples que exclui outros efeitos, tais como a dispersão, que ocorre ao longo do tempo devido à não linearidade dos sistemas reais.

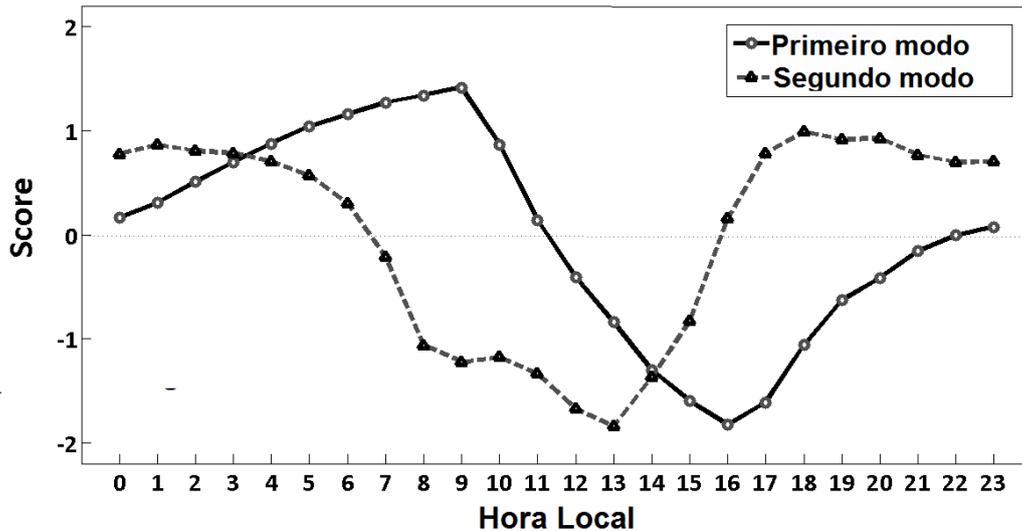


Figura 3.14 - Série temporal (*PC score*) da primeira (49%) e segunda (31%) EOF do modo-S calculadas usando os dados de anomalias de temperatura média horárias na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.

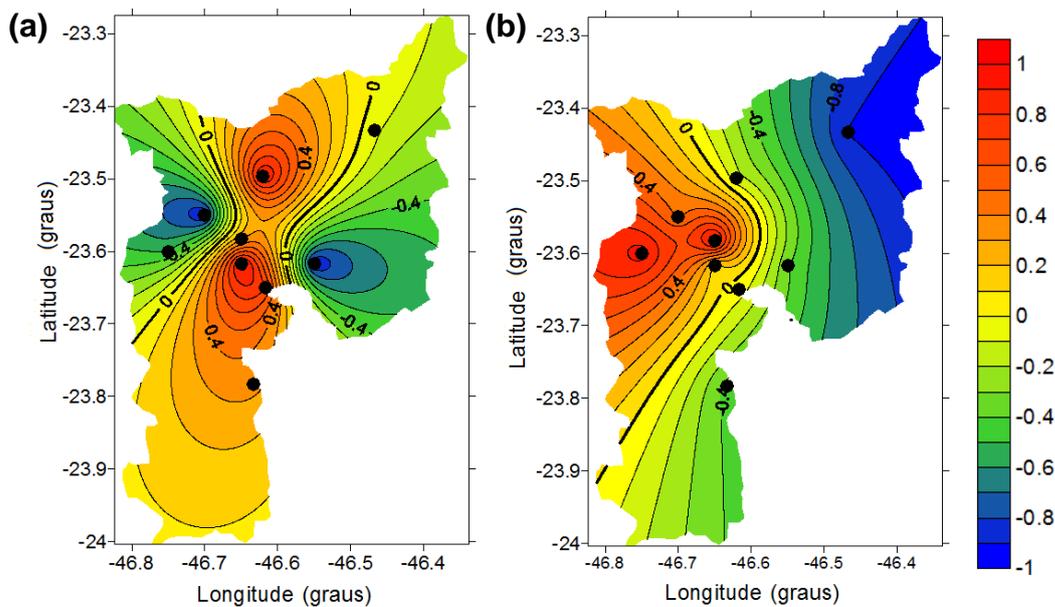


Figura 3.15 – Padrão espacial (*PC loading*) da (a) primeira (49%) e (b) segunda (31%) EOF do modo-S calculadas usando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.

A análise sazonal das estruturas espaciais da EOF foi realizada apenas para a EOF do modo-T, uma vez que o objetivo é obter os padrões espaciais do campo de anomalia de temperatura e suas sequências de ocorrência ao longo do ano. Os padrões temporais e espaciais obtidos (Figuras 3.16-3.19) foram similares aos padrões do modo-T (Figuras 3.12

e 3.13). Contudo, o verão e o inverno somente apresentam dois modos (Figura 3.16 e Figura 3.17), enquanto que o outono e a primavera apresentam três modos (Figura 3.18 e Figura 3.19).

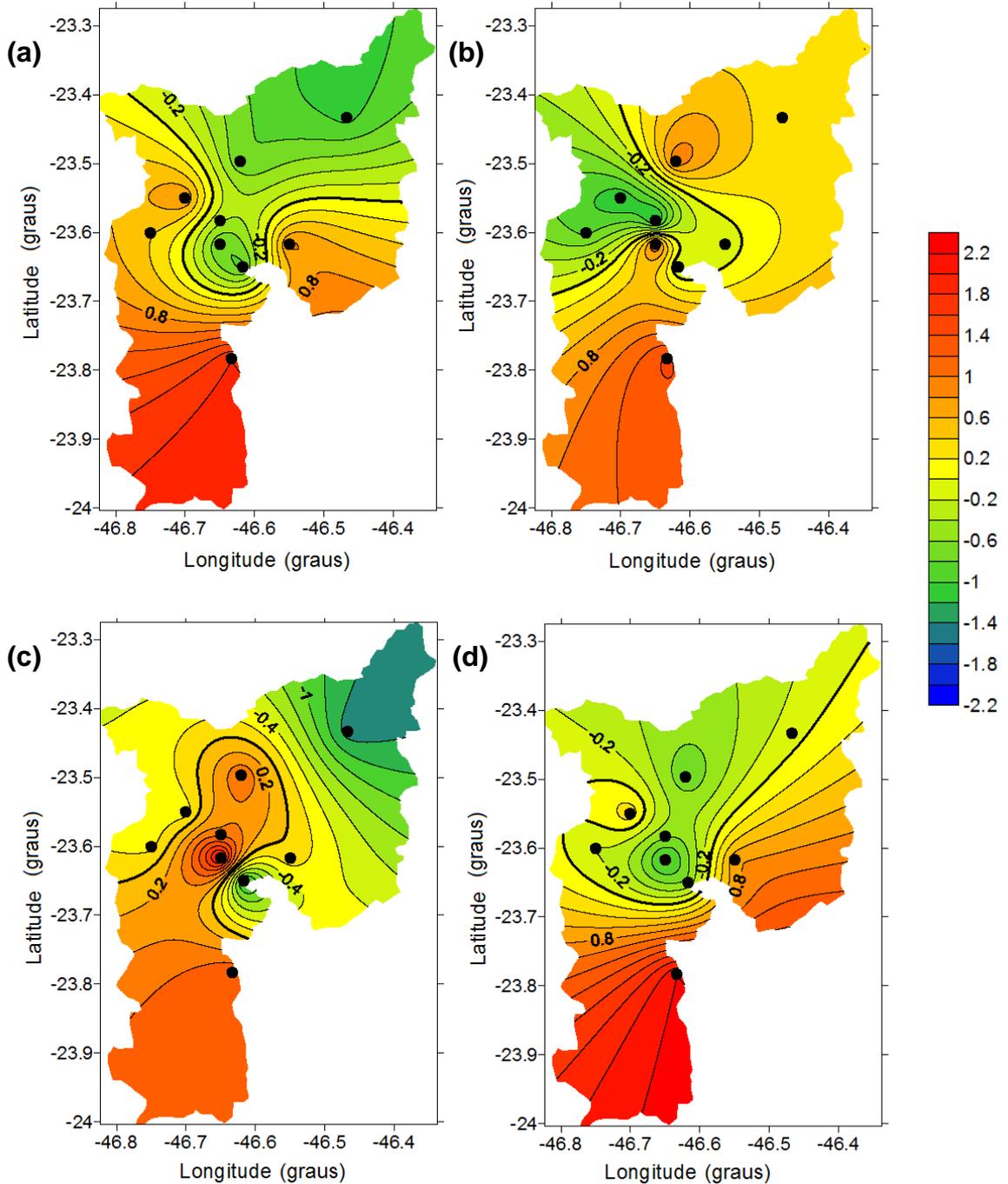


Figura 3.16 - Padrão espacial (PC score) da (a) primeira (78%) e (b) segunda (17%) EOF do modo $-T$ para o verão e o padrão da (c) primeira (75%) e (d) segunda (20%) EOF do modo $-T$ no inverno; esses padrões foram calculados utilizando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.

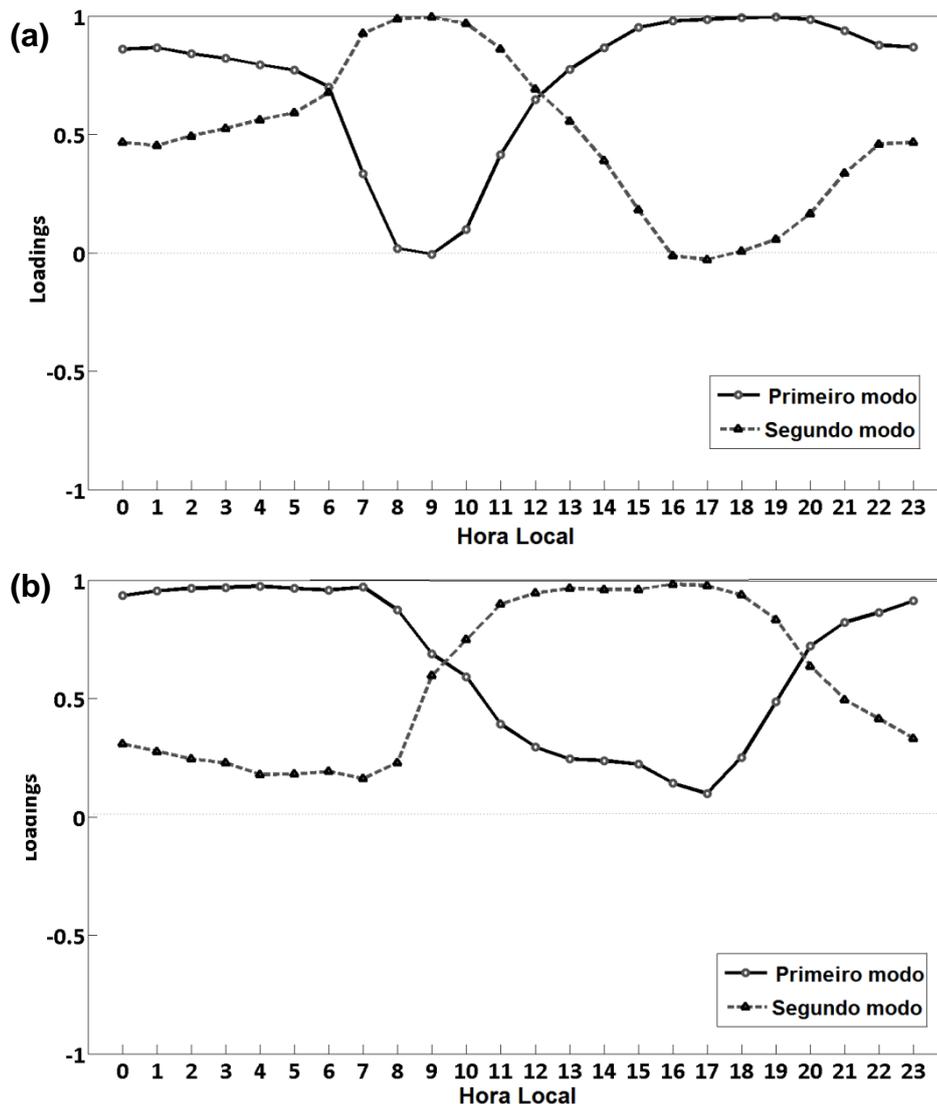


Figura 3.17- Série temporal (*PC loading*) da primeira e da segunda EOF do modo-T para o (a) verão e o (b) inverno, que foram calculadas utilizando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSF de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.

Durante o verão e o inverno, o primeiro modo da EOF explicaram, respectivamente, 78% e 75% da variância, e o segundo modo explicaram 17% e 20% da variância, respectivamente. No outono e na primavera, o primeiro modo da EOF explicaram 69% e 55% da variância total da temperatura, respectivamente, o segundo explicou 23% e 28%, respectivamente, e o terceiro explica 6% e 14%, respectivamente. Essa redução do número dos modos de variabilidade nas estações de verão e inverno, possivelmente, ocorre porque nestas estações as propriedades

termodinâmicas da atmosfera são mais bem configuradas que nas estações de transição (outono e primavera) da RMSP, fazendo com que apenas dois modos sejam encontrados.

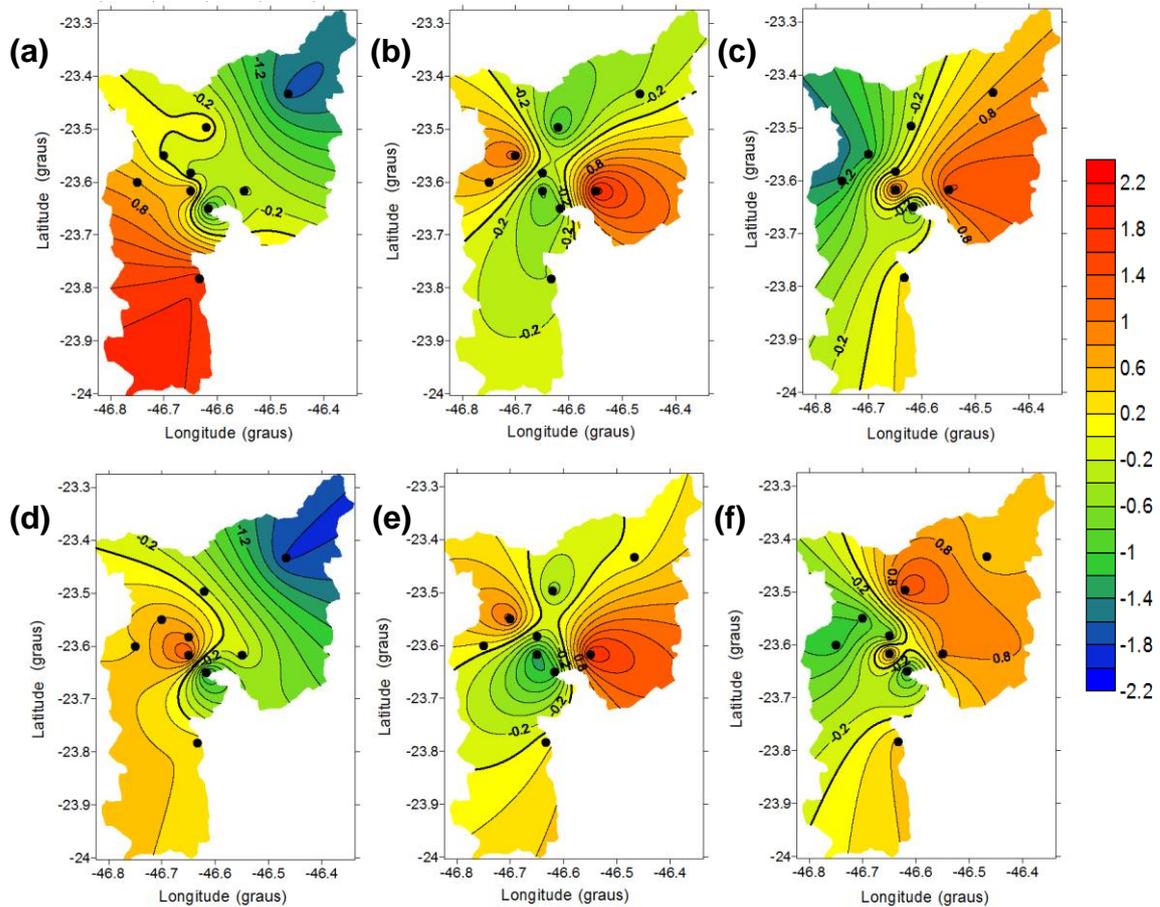


Figura 3.18 - Padrão espacial (*PC score*) da (a) primeira (69%), (b) segunda (23%) e (c) terceira (6%) EOF do modo-T durante o outono e padrão da (d) primeira (55%), (e) segunda (28%) e (f) terceira (14%) EOF do modo-T durante a primavera; estes padrões foram calculados utilizando os dados de anomalias de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011. A linha preta mais grossa representa o valor zero. As isolinhas estão em intervalos de 0,4.

Outro resultado que se destaca na análise sazonal é a variância total representativa dos modos de variabilidade em cada estação. No verão e no inverno, os dois modos de variabilidade dominantes explicam cerca de 98% da variância total, enquanto que no outono, os três modos de variabilidade explicam cerca de 98% da variância total, e na primavera os três modos explicam 97% da variância. Estas diferenças entre as estações e os diferentes padrões termodinâmicos da atmosfera que

ocorrem em cada estação do ano (como descrito acima) podem estar associadas com as forçantes remotas, que pode aumentar a variância total nas estações de transição em relação a outras estações.

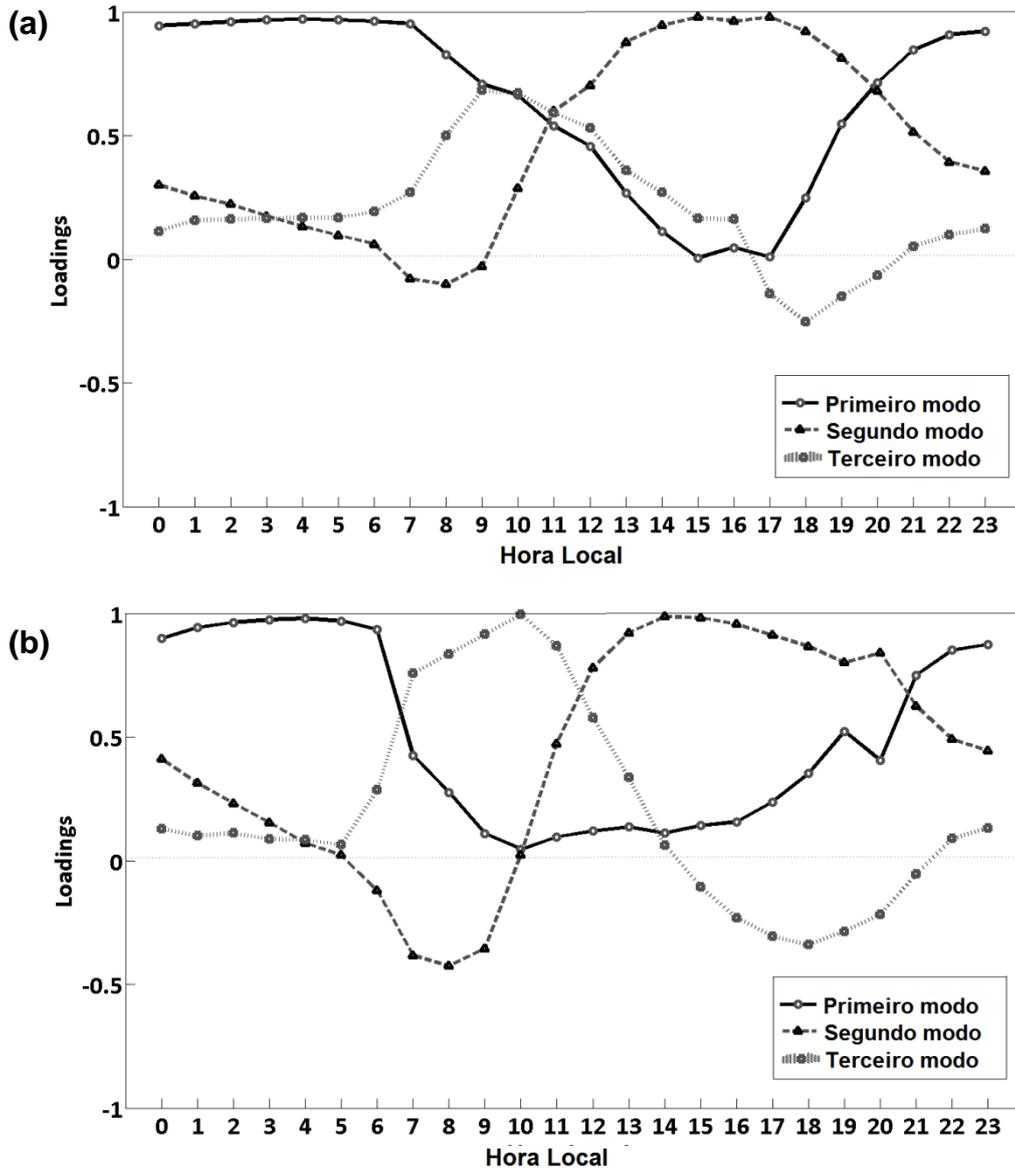


Figura 3.19 – Série temporal (*PC loading*) da primeira e segunda EOF do modo-T durante o (a) outono e a (b) primavera, que foram calculadas utilizando os dados de anomalia de temperatura média horária na RMSP de Janeiro/2002 a Dezembro/2011.

Como apresentado no Apêndice A, a análise da distribuição sazonal dos coeficientes de correlação entre as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) e as anomalias de temperatura médias observadas na RMSP para o período de 10 anos (2002-2011), evidencia a existência de uma significativa correlação entre estes dois coeficientes

na área do Oceano Atlântico próximo à costa da região Sudeste do Brasil, o que indica que a RMSP é afetada principalmente pela TSM do oceano vizinho. A influência remota do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) tem pouca ou nenhuma influência. No entanto, durante o outono e a primavera, além de haver uma forte correlação com a área do Oceano Atlântico Sul, uma correlação, embora fraca, foi evidenciada com a área de Niño 3.4, indicando que os fatores sazonais nesta área, tais como a temperatura do ar/intensidade da ICU na RMSP, bem como os fenômenos em escala local sofrem uma influência remota do ENOS.

3.4.3. Análise de Cluster

A metodologia da análise de EOF foi capaz de determinar os padrões espaciais de anomalias de temperatura na RMSP e identificar as áreas de núcleos mais quentes e mais frios, bem como a evolução temporal desses padrões espaciais ao longo do dia. Com base nestes resultados, as regiões homogêneas ou grupos podem ser identificados para determinar o grau de semelhança e diferença entre as observações individuais e definir os grupos de estações que são similares. Na AC, os grupos homogêneos devem ser idênticos aos grupos observados na regionalização espacial da análise de EOF.

Como descrito anteriormente, não existe nenhuma definição que determine as alturas dos nós em um dendograma. Como o objetivo é reunir estações com características semelhantes, distâncias elevadas não são consideradas, porque elas formam grandes grupos com alta diversidade intra-cluster. Portanto, 50% de distância foi usada para determinar o número de grupos (Figura 3.20a).

O limiar de 6 grupos intra-homogêneos foi a melhor representativa do padrão da temperatura na RMSP e é consistente com os resultados mostrados na análise da EOF. Os 6 grupos encontrados (Figura 3.20a) são os seguintes: grupo 1 (USP-Água Funda, Guarulhos), grupo 2 (Congonhas, Mirante), grupo 3 (Ibirapuera, Taboão da Serra), grupo 4 (Pinheiros), grupo 5 (São Caetano do Sul) e grupo 6 (Parelheiros). A

Figura 20b ilustra o mapa de distribuição das estações, de acordo com os 6 grupos homogêneos da RMSP, e cada cor corresponde a um grupo. O mapa da distribuição espacial dos grupos (Figura 3.20b) demonstra que os 6 grupos homogêneos da AC correspondem as áreas dos padrões espaciais encontrados na análise de EOF em ambos os modos. No geral, a AC corrobora com a análise de EOF, os grupos da AC correspondem ao padrão espacial da segunda PC do modo-T e com a primeira PC do modo-S.

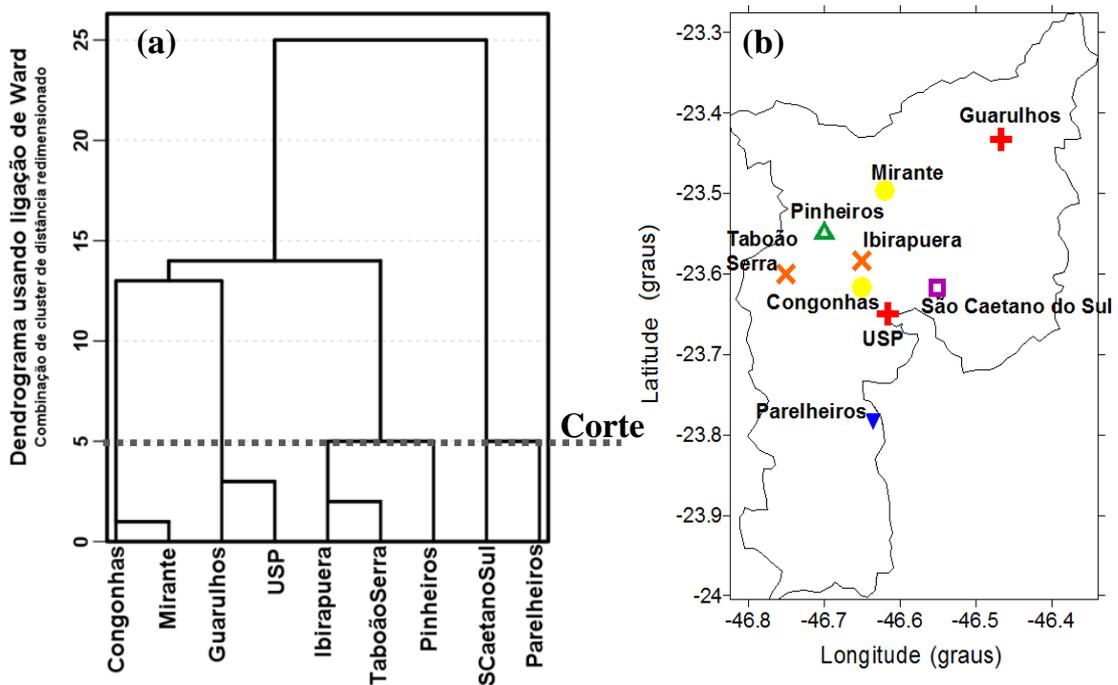


Figura 3.20 - (a) Resultado do dendrograma com as 9 estações meteorológicas e (b) mapa de distribuição das estações com os 6 grupos homogêneos da RMSP. Cada símbolo (ou cor) corresponde a um dos grupos: grupo 1 (vermelho), grupo 2 (amarelo), grupo 3 (laranja), grupo 4 (verde), grupo 5 (roxo) e grupo 6 (azul).

A análise subjetiva do mapa de classificação de uso do solo (Figura 3.6 e a análise da localização de cada estação, Apêndice B) resultou na classificação dos seis grupos da seguinte forma: grupo urbano 1 (São Caetano do Sul, roxo), grupo urbano 2 (Pinheiros - verde), grupo urbano 3 (Taboão da Serra e Ibirapuera - laranja), grupo urbano 5 (Congonhas e Mirante - amarelo), grupo urbano 6 (Guarulhos e USP - vermelho) e o grupo vegetado (Parelheiros - azul).

3.4.4. Intensidade da ICU

Para determinar a IICU, as estações representativas de cada área foram selecionadas a partir dos grupos obtidos pela AC. Entre os 6 grupos homogêneos, o grupo 6 (composto apenas pela estação de Parelheiros) é posicionada na região mais distante da área central da RMSP e é caracterizada predominantemente pela presença da vegetação. Portanto, para estimar a IICU, o grupo 6 foi escolhido para representar a temperatura das áreas não-urbanas/vegetadas, e os outros grupos (1, 2, 3, 4 e 5) foram selecionados para representar as áreas urbanas.

A IICU foi estimada para todos os grupos urbanos da seguinte forma: a primeira estimativa da IICU (chamado de caso 1) foi baseada na diferença da temperatura entre as estações São Caetano do Sul e Parelheiros; a segunda estimativa (caso 2) foi baseada nas diferenças de temperatura entre as estações Pinheiros e Parelheiros; a terceira estimativa (caso 3) a temperatura da estação Parelheiros foi subtraída da temperatura média entre as estações de Congonhas e Mirante; a quarta estimativa (caso 4), a temperatura da estação Parelheiros foi subtraída da temperatura média entre as estações da Taboão da Serra e Ibirapuera; e a quinta estimativa (Caso 5) baseou-se na temperatura da estação Parelheiros subtraída da temperatura média entre as estações de Guarulhos e USP-Água Funda. Exceto para o caso 5, um ciclo diurno claro é observado para a IICU, embora em cada caso os picos ocorram em diferentes períodos de tempo (Figura 3.21).

Os picos de máxima IICU ocorrem no período da tarde, aproximadamente as 15HL para os casos 1 e 2, e as 17:00HL para o caso 4. Para o caso 3, um pico de máxima ocorre na parte da manhã cerca de 8HL e um pico secundário ocorre no final da noite cerca das 22HL. Dessa forma, a seleção das estações de referência pode refletir a distintos padrões da IICU, por isso, critérios específicos são recomendados para a sua seleção. O comportamento da IICU do caso 1 é consistente com o padrão encontrado por Ferreira et al. (2012), que estimou a ICU para o ano de

2004 e observou que o comportamento da IICU segue a evolução diurna do saldo de radiação na superfície para todos os meses do ano, mas que geralmente apresenta um atraso de 3 horas com a intensidade máxima de radiação líquida

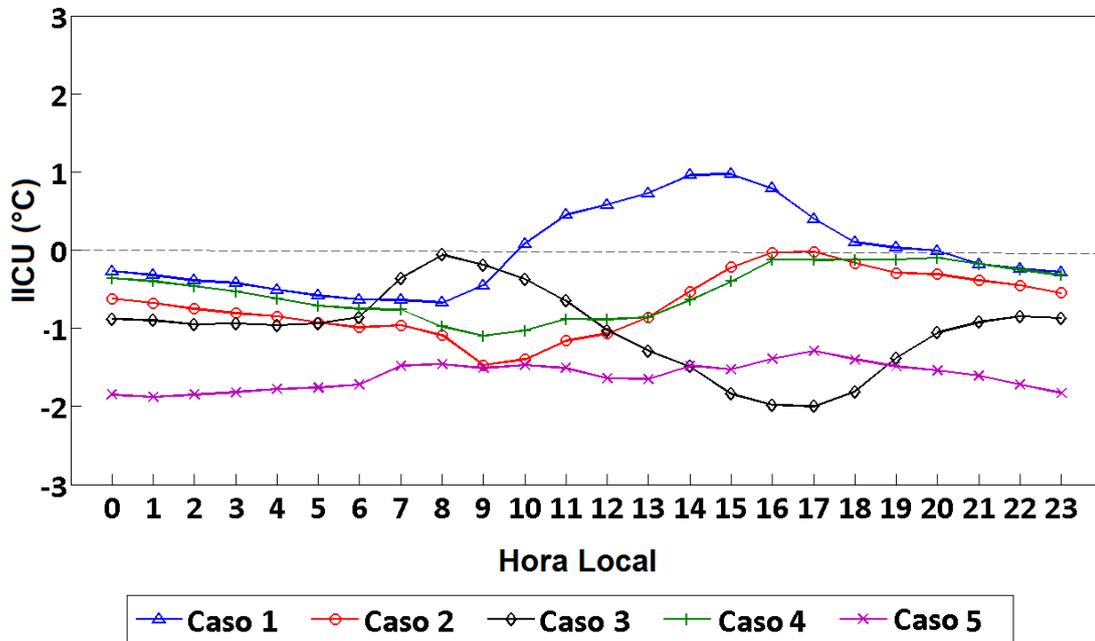


Figura 3.21 - Ciclo diurno anual médio da intensidade da ICU para os diferentes casos: caso 1 (São Caetano do Sul - Parelheiros), caso 2 (Pinheiros - Parelheiros), caso 3 (Congonhas / Mirante - Parelheiros), caso 4 (Ibirapuera / Taboão da Serra - Parelheiros), e caso 5 (Guarulhos / USP - Parelheiros).

Na análise sazonal da ICU na RMSP (Figura 3.22), a primavera é a estação que apresenta os valores de máximo e de mínimo da IICU mais elevados em comparação com as outras estações, e o inverno apresenta os valores mais baixos da IICU. O período de ocorrência da máxima IICU ocorre em horários diferentes para cada estação. Na primavera, verão e inverno, os valores máximos de IICU ocorrem às 15HL, 13HL e 16HL, respectivamente. No outono, dois picos de máximos foram observados, um às 12HL e outro entre 14-15HL, indicando que a ocorrência da máxima IICU varia com o tempo de acordo com cada estação. Estudos já evidenciaram que esta variação está provavelmente relacionada com a radiação solar incidente na superfície, que apresenta a variação sazonal significativa. A radiação de onda curta em São Paulo apresenta o seu pico

máximo durante a primavera, particularmente em setembro, e valores mínimos durante o outono e inverno (FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2002).

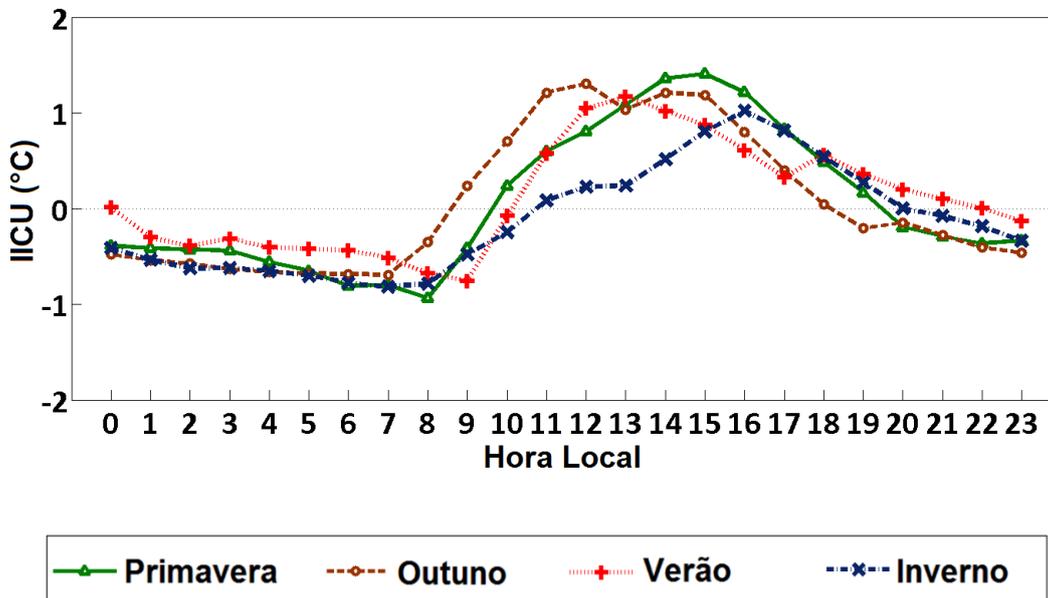


Figura 3.22 - Ciclo diurno sazonal da intensidade da ICU na RMSP: primavera (verde), outono (marrom), verão (vermelho) e inverno (azul).

3.4.5. Caracterização da qualidade do ar

A metodologia da análise de cluster aplicada aos dados de temperatura do ar também foi utilizada nos dados de poluentes atmosféricos com a finalidade de reconhecer regiões/grupos de estações com o mesmo padrão homogêneo.

A aplicação da análise de cluster nos poluentes atmosféricos permite a identificação de diferentes grupos/clusters, de modo que, o agrupamento das estações pode se dar em função das diferenças das características das fontes de emissão em cada lugar, da escala de representatividade espacial de cada estação, bem como das condições meteorológicas locais decorrentes de diferentes condições de topografia, em conjunto com os sistemas meteorológicos de grande e/ou média escala, que influenciam na circulação e transporte do poluente e de seus precursores de uma região para outra.

A análise de cluster usada nesta abordagem segue as mesmas condições que os dados de temperatura do ar, como medida de similaridade foi utilizada a Distância Euclidiana e o processo de agrupamento hierárquico foi o método de Ward. Os poluentes atmosféricos analisados foram CO, O₃, PM10 e NO_x compreendidos no período de 2002-2011.

A quantidade de estações que medem cada poluente é diferente do número das estações usadas para a variável da temperatura do ar, portanto, nessa análise não é possível comparar se os grupos dos poluentes coincidem com os grupos da temperatura do ar. Além disso, o número de estações de qualidade do ar também se difere para cada poluente, uma vez que algumas estações monitoram parâmetros que outras estações não coletam. As informações sobre o monitoramento das variáveis em cada estação já foram apresentadas na seção 3.2.2.

Como o objetivo dessa seção é simplesmente apresentar uma análise qualitativa de agrupamentos de estações com o mesmo padrão, optou-se por não adotar as mesmas estações para os poluentes. A análise da frequência e intensidade do comportamento dos poluentes é apresentada em gráficos de evolução temporal dos grupos definidos na AC.

Para o Monóxido de Carbono (CO) foram encontradas na AC cerca de 4 grupos distintos (Figura 3.23): Grupo 1 - verde (Ibirapuera, Santo Amaro, Mooca, Parelheiros, IPEN-USP); Grupo 2 - amarelo (Pinheiros e Taboão da Serra); Grupo 3 - vermelho (P. D. Pedro II, São Caetano do Sul, Cerqueira Cezar) e Grupo 4 – azul (Congonhas). A Figura 3.24 ilustra a série temporal média horária de cada um dos grupos de CO.

Na distribuição de CO é evidenciado que os grupos 2 (Pinheiros e Taboão da Serra) e grupo 3 (P. Pedro II, São Caetano do Sul e Cerqueira Cezar), compõem os grupos com um dos maiores valores de CO, uma vez que as estações que compõem esses grupos estão localizadas em regiões com intensa quantidade de veículo, próximo a rodovias como marginais, além da presença de indústrias próximo a algumas estações (Figura 3.24). Enquanto estações localizadas em regiões comerciais/residenciais com

certa quantidade de circulação veículos e com a presença de área verde, no entorno e nas regiões vizinhas, apresentam as menores taxas de CO, essas estações (Ibirapuera, Santo Amaro, Mooca, Parelheiros, IPEN-USP) englobam o grupo 1 (verde).

Nesta análise, destaca-se o grupo 4 (azul) composto pela estação de Congonhas, que se mostra como um grupo isolado dos demais, possivelmente, associado ao alto número de veículos e emissões decorrentes de aeronaves, uma vez que essa estação está próxima num dos mais importantes aeroportos da RMSP. Tal comportamento é evidenciado na série temporal que apresenta os maiores valores de CO em relação aos outros grupos.

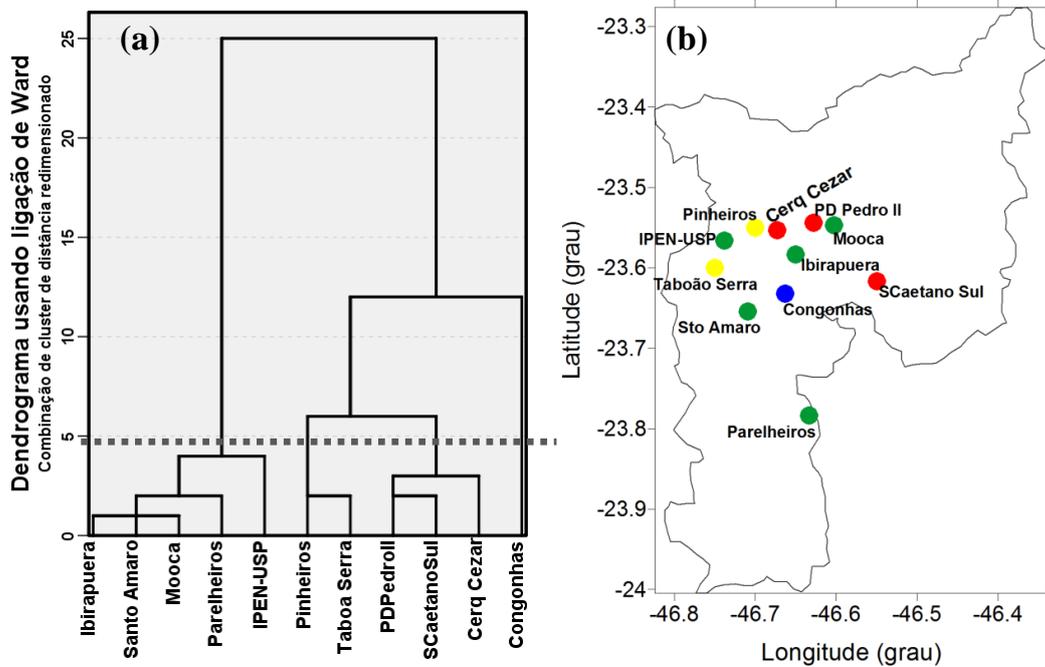


Figura 3.23 - (a) Dendrograma resultante de 11 estações de medição do CO e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 4 grupos homogêneos de CO na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (verde); grupo 2 (amarelo); grupo 3 (vermelho) e grupo 4 (azul).

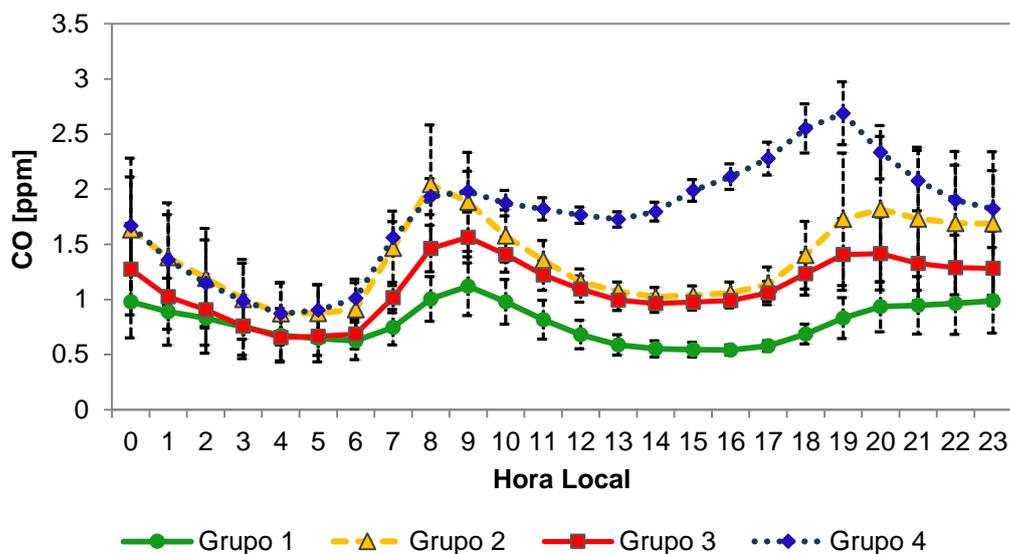


Figura 3.24 - Evolução temporal média do CO no período de 2002-2011 para os 4 grupos definidos na análise de cluster.

Para o Óxidos de Nitrogênio (NO_x) também foram encontradas na AC, 4 grupos (Figura 3.25): Grupo 1 - azul (Ibirapuera; IPEN-USP; Mauá; Parelheiros); Grupo 2 - vermelho (P.D. Pedro II ; São Caetano do Sul); Grupo 3 - verde (Pinheiros; Taboão da Serra; Cerqueira Cezar) e Grupo 4 – amarelo (Congonhas). Assim como na análise dos grupos do CO, no NO_x a estação de Congonhas (grupo 4) é a que apresenta os maiores valores horários de NO_x na evolução da série temporal (Figura 3.26), demonstrando, mais uma vez, que a influência dos veículos leves e pesados sobreposto com os impactos das aeronaves, caracterizam essa região com os maiores valores de NO_x .

De um modo geral, a distribuição dos outros grupos de NO_x são similares ao CO, com exceções de algumas estações que se diferem na composição dos grupos. O grupo 1 – azul (Ibirapuera; IPEN-USP; Mauá e Parelheiros), apresenta os menores valores de NO_x por serem regiões com características residenciais como um menor número de circulação de veículos e predomínio de áreas verdes (Figura 3.26). O grupo 2 - vermelho (P.D. Pedro II; São Caetano do Sul) e o grupo 3 - verde (Pinheiros; Taboão da Serra; Cerqueira Cezar) do NO_x também se assemelham, respectivamente, ao grupo 3 e 2 do CO, regiões com intenso tráfego de veículos leves e pesados, apresentando os maiores

valores de NO_x dos demais grupos. Isso ocorre por essas estações estarem localizadas em áreas comerciais e industriais.

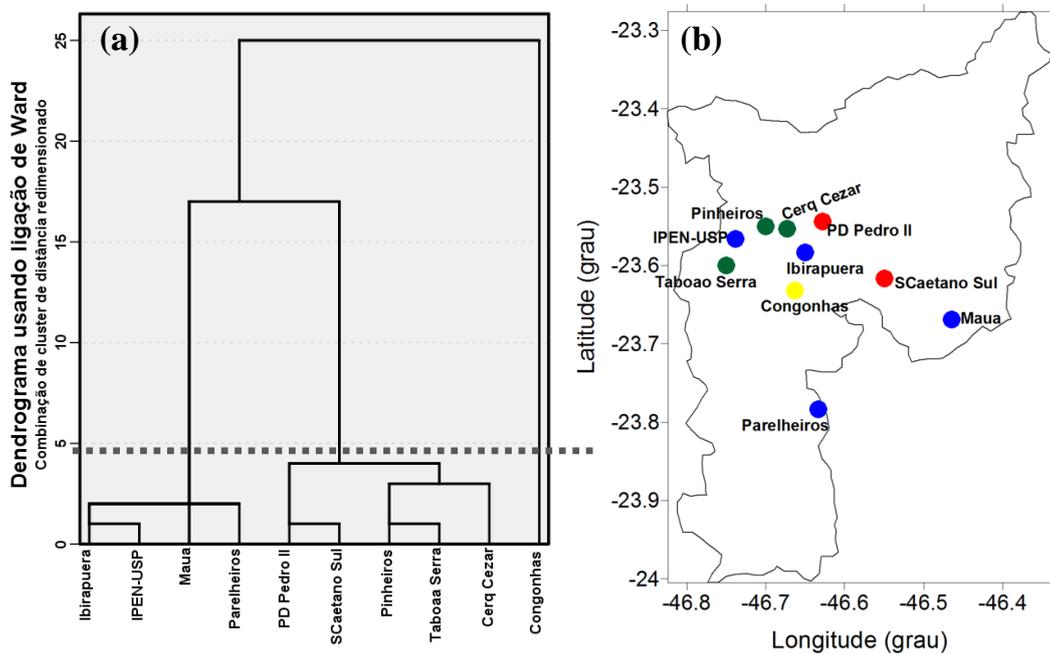


Figura 3.25 - (a) Dendrograma resultante de 10 estações de medição do NO_x e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 4 grupos homogêneos de NO_x na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (azul); grupo 2 (vermelho); grupo 3 (verde) e grupo 4 (amarelo).

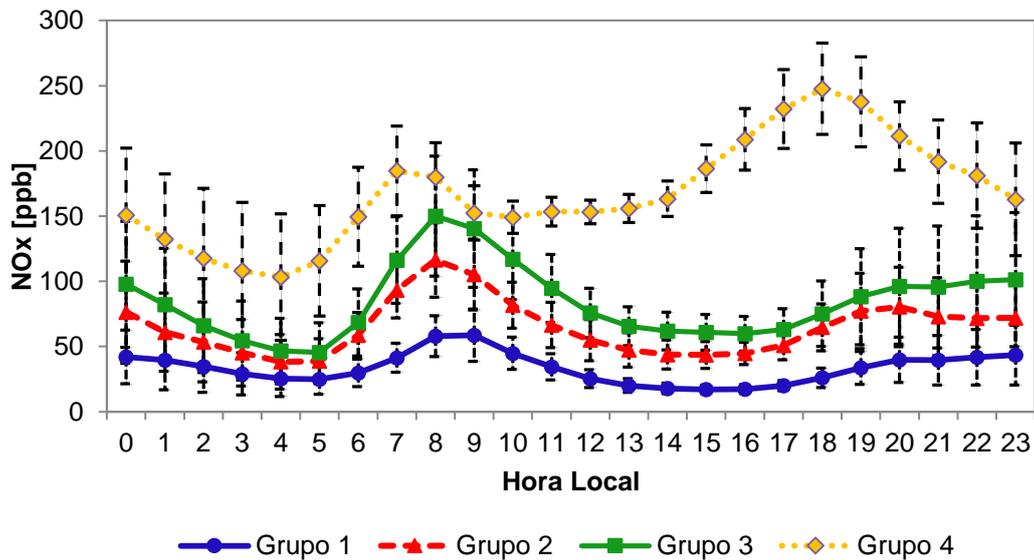


Figura 3.26 - Evolução temporal média do NO_x no período de 2002-2011 para os 4 grupos definidos na análise de cluster.

Na análise de cluster para o Ozônio (O_3), uma alta variabilidade do número dos grupos é identificada; 6 grupos distintos foram encontrados (Figura 3.27): Grupo 1 – vermelho (Diadema, Santo André, Mauá, Santana); Grupo 2 – laranja (Santo Amaro e São Caetano do Sul); Grupo 3 – azul (Ibirapuera, IPEN-USP); Grupo 4 - amarelo (P. D. Pedro II e Pinheiros), Grupo 5 – verde (Mooca e Nossa Senhora do O) e Grupo 6 – roxo (Parelheiros).

Como já descrito no Capítulo 2, o Ozônio por ser um poluente secundário, (não é emitido diretamente, mas formado a partir de outros poluentes atmosféricos e alguns fatores), se forma em regiões distantes da fonte de origem de seus precursores. Isso pode ser observado na evolução da série temporal (Figura 3.28). Em geral, os grupos que se mostraram com as maiores concentrações de NO_x são os grupos que apresentam os menores valores médios horários de O_3 devido ao transporte do NO_x , por exemplo, o grupo 4.

O grupo 4 – amarelo (PD. Pedro II e Pinheiros) corresponde a regiões com intensa emissão de NO_x , devido ao alto tráfego de veículos (estação de Pinheiros próximo a Marginal Pinheiros e PD Pedro II vizinha a um terminal rodoviário), que se desloca na atmosfera e dá origem ao O_3 em regiões distantes a essas estações. O que acarreta, portanto, em baixos valores de ozônio no grupo 4. O contrário ocorre com o grupo 3 (azul) composto pelas estações IPEN-USP e Ibirapuera (Figura 3.28), as quais são caracterizadas por um alto predomínio de vegetação, mas mesmo assim apresentam as maiores concentrações horárias do O_3 , o que evidencia que na região dessas estações há uma significativa formação desse poluente secundário. No entanto, para o grupo 2 (laranja – Santo Amaro e São Caetano do Sul) é interessante observar que a estação de São Caetano do Sul está localizada numa área com características comerciais e industriais com intensa atividade industrial e tráfego de veículos, e mesmo assim, faz parte de um grupo cujos valores de O_3 são um dos mais elevados. Os demais grupos (grupo 1 - vermelho e grupo 5 -

verde) apresentam valores intermediários de O₃, com exceção do grupo 6 – roxo (estação Parelheiros) cujos valores de O₃ são os menores.

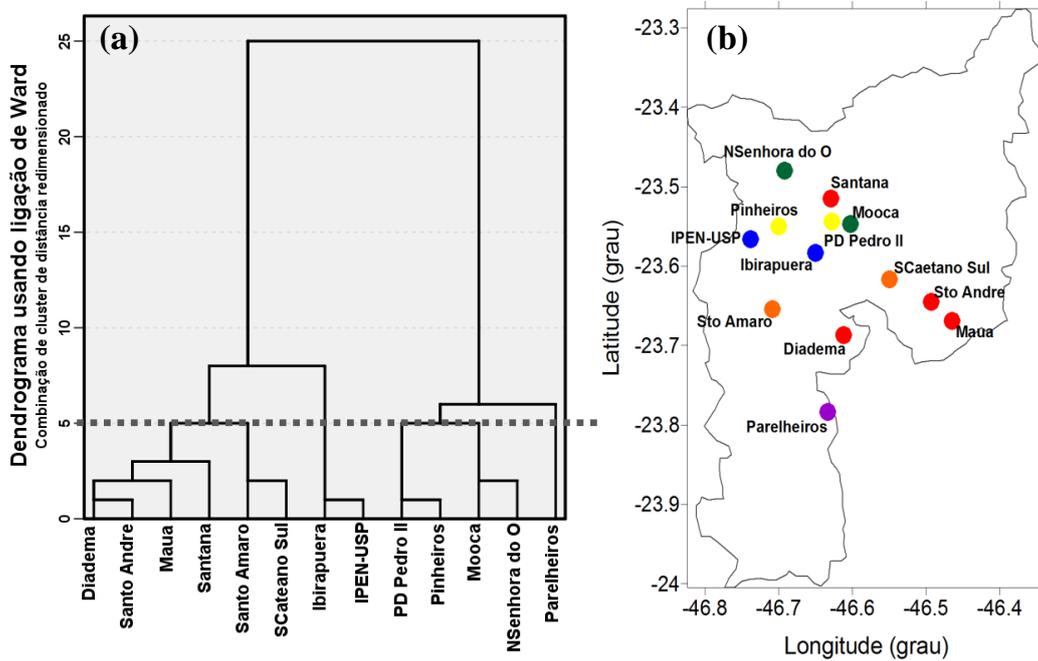


Figura 3.27 - (a) Dendrograma resultante de 13 estações de medição do O₃ e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 6 grupos homogêneos de O₃ na RMSP, cada cor corresponde a um grupo: grupo 1 (vermelho); grupo 2 (laranja); grupo 3 (azul); grupo 4 (amarelo); grupo 5 (verde) e grupo 6 (roxo).

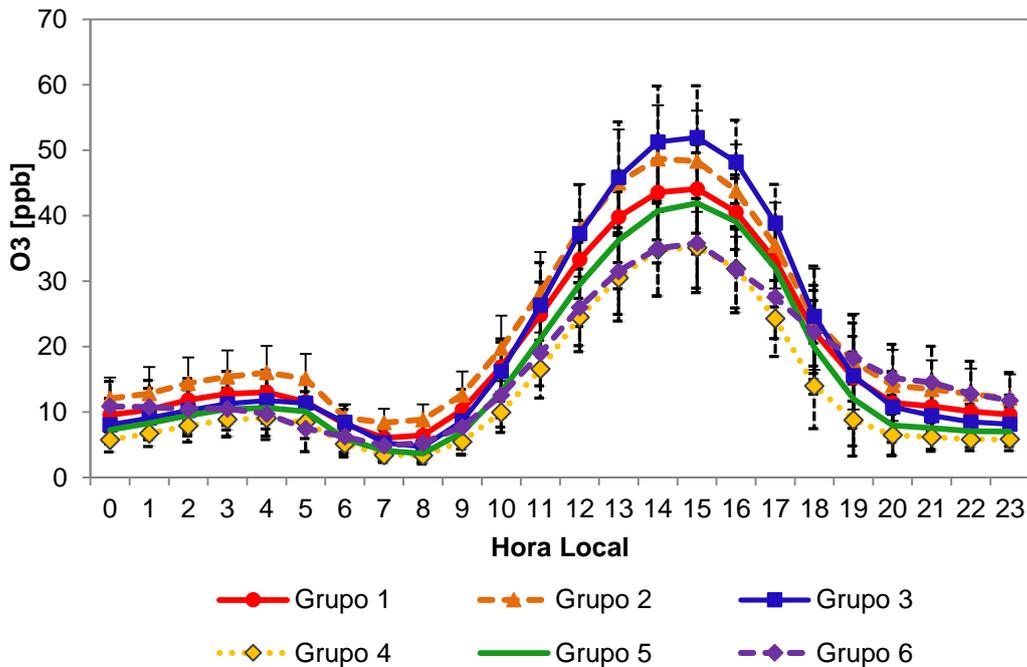


Figura 3.28 - Evolução temporal média do O₃ no período de 2002-2011 para os 6 grupos definidos na análise de cluster.

Para o material particulado (PM10), foram encontrados 8 grupos na AC: (Figura 3.29) Grupo 1 – azul (Santana; São Caetano do Sul; Diadema; Cerqueira Cezar); Grupo 2 - amarelo (PD Pedro II ;Taboão da Serra); Grupo 3 –laranja (Mauá ;Mooca); Grupo 4 – marrom (Parelheiros), Grupo 5 - roxo (N. Senhora do Ó; Santo André - Capuava); Grupo 6 – rosa (Ibirapuera), Grupo 7 - verde (Pinheiros; Santo Amaro) e grupo 8 – vermelho (Congonhas).

Na análise do PM10 o grupo com comportamento mais marcante é o grupo 8 - vermelho (Congonhas) que apresenta os maiores valores de PM10 no ciclo diurno (Figura 3.30), o que confirma, como já exposto, que a presença de aeronaves na região acarreta numa grande quantidade de partículas na atmosfera, efeito que é principalmente evidenciado no final da tarde e início da noite. Também se destaca o grupo 4 - marrom (Parelheiros), que mesmo sendo uma região afastada da área urbana da RMSP, apresenta altos valores de PM10 durante a madrugada e nas primeiras horas da manhã, possivelmente associados à circulação local que transposta às partículas em suspensão da região mais ao Sul (Cubatão e vizinhança) carregando em direção para esta estação.

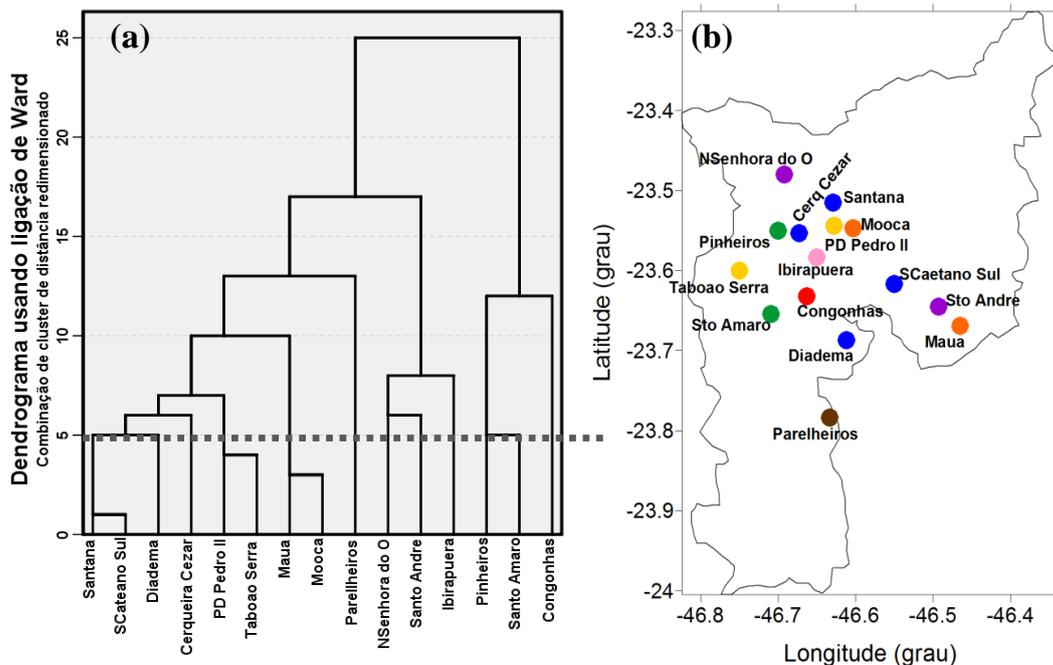


Figura 3.29 - (a) Dendrograma resultante de 15 estações de medição do PM10 e (b) mapa de distribuição das estações de acordo com 8 grupos homogêneos de PM10 na RMSP, cada cor

corresponde a um grupo: azul (grupo 1); amarelo (grupo 2); laranja (grupo 3); marrom (grupo 4); roxo (grupo 5); rosa (grupo 6); verde (grupo 7) e vermelho (grupo 8).

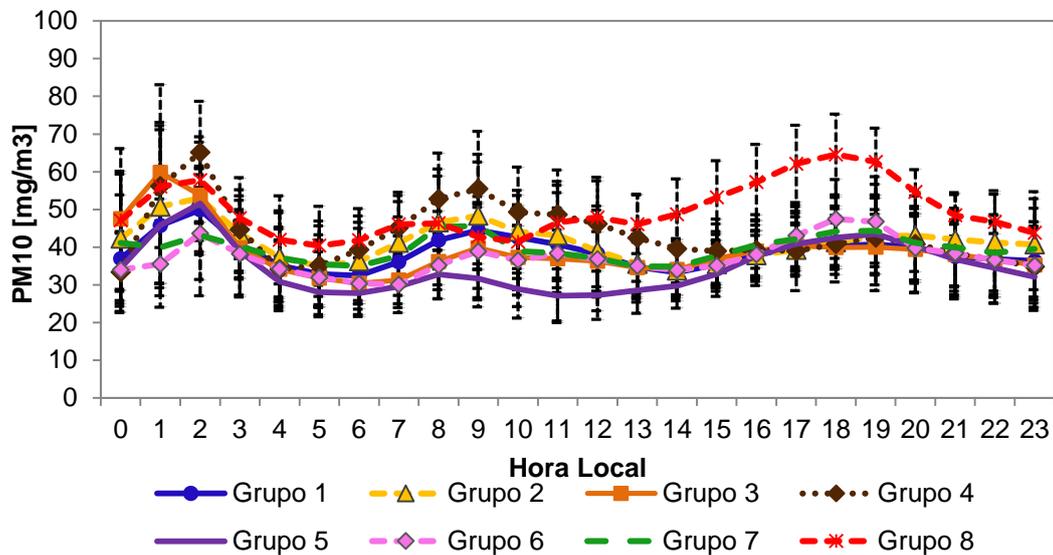


Figura 3.30 - Evolução temporal média do PM10 no período de 2002-2011 para os 8 grupos definidos na análise de cluster.

3.5. Conclusões Parciais

A análise multivariada dos dados de temperatura do ar observados demonstraram as estruturas espaciais e temporais da ICU para o período 2002-2011. Na análise de EOF, modos dominantes de variabilidade da ICU foram reconhecidos pela aproximação do modo-S e modo-T.

Na análise da EOF no modo-T, três modos principais de variabilidade foram identificados na RMSP, e explicam 99% da variância total dos dados. O primeiro modo explicou 67% da variância, o segundo modo explicou 24%, e o terceiro modo com 8%. O primeiro e o terceiro modos da EOF representam apenas a um único modo e estão associados com os mecanismos de circulação dos ventos na RMSP relacionados com a brisa marítima, enquanto que o segundo modo está associado com a urbanização e a liberação de calor armazenado no dossel urbano e pelas fontes antropogênicas, bem como com a circulação dos ventos locais na RMSP. O padrão de distribuição espacial da anomalia de temperatura na

segunda PC é semelhante ao mapa espacial da Temperatura Aparente da Superfície da RMSP.

Para a análise da EOF no modo-S, apenas dois modos de variabilidade foram encontrados, o primeiro modo que explica 49% da variância total e o segundo modo com 31% da variância. No modo-S, o primeiro modo representa o padrão espacial da ICU na RMSP, e é semelhante ao segundo modo da EOF no modo-T. Portanto, tanto no modo-S como no modo-T foram encontrados o padrão espacial da ICU na RMSP.

Na análise da EOF sazonal, foi observada a diferença no número de modos de variabilidade entre as estações do ano, com verão e inverno cada uma apresentando dois modos de variabilidade, enquanto o outono e a primavera apresentando três modos. Essa diferença pode estar associada com os padrões termodinâmicos da atmosfera, que são diferentes em cada estação, bem como devido às forçantes remotas, como a ocorrência de eventos de El Niño/La Niña, que podem influenciar a temperaturas do ar nas estações do ano.

As duas análises de EOF permitiram a identificação dos diferentes núcleos quentes de temperatura do ar na RMSP, assim como suas intensidades, tamanhos, localizações e variações ao longo do ciclo diurno. Com Análise de Cluster da temperatura do ar foram identificados seis grupos homogêneos, sendo consistentes com os padrões espaciais principais encontrados na análise de EOF. Portanto, com a utilização das técnicas de análise multivariada, foram estabelecidos os principais padrões de anomalias de temperatura para a RMSP.

Os padrões espaciais de temperatura identificados foram utilizados para analisar o comportamento da ICU na RMSP. Na análise da ICU, as estimativas das diferenças de temperatura entre as áreas urbanas/suburbanas e as áreas não-urbanas/vegetadas foram calculadas. O grupo 6 (estação de Parelheiros) foi considerado como o grupo não-urbano/vegetado, por estar mais afastado da área central da RMSP além da presença de área verde, e os outros grupos (1, 2, 3, 4 e 5) foram

considerados como os grupos urbanos/suburbanos. Os resultados das estimativas da IICU mostraram que as intensidades máximas e mínimas de IICU ocorrem em horários diferentes para cada caso. De modo que se evidenciou que a escolha de estações de referência pode refletir a distintos padrões de IICU, indicando que critérios devem ser adotados ao selecionar as estações.

Para uma avaliação detalhada da ICU, análises anuais e sazonais da IICU foram realizadas para a RMSP para o período 2002-2011. Para estimar a IICU, diferenças de temperatura entre as estações de São Caetano do Sul e Parelheiros foram usadas. Na análise anual da IICU foi evidenciado um padrão diurno com seu máximo entre as 14-16HL e um mínimo entre 07-09HL. Esse padrão diurno com o valor máximo da IICU no período da tarde ocorre em torno de cerca de 3 horas após a intensidade máxima de radiação líquida.

Na análise sazonal, a primavera é a estação que apresenta os maiores valores máximos e mínimos da IICU. As quatro estações apresentaram diferentes horários de ocorrência de máximos da IICU às 15HL, 13HL, 16HL para a primavera, verão e inverno, respectivamente. No outono, dois máximos foram identificados às 12HL e 14-15HL. A máxima IICU na primavera, particularmente em setembro, está relacionada com a máxima radiação solar líquida causada por significativas variações sazonais na transmissividade atmosférica e emissividade efetiva. A explicação da máxima IICU no mês de setembro é baseada nos resultados obtidos no estudo de Ferreira *et al.* (2012). De acordo com os autores, a transmissividade atmosférica máxima (0,57) e a mínima emissividade efetiva (0,79) ocorrem simultaneamente em setembro, quando a umidade relativa atinge o mínimo em São Paulo (73%) inferior ao valor climatológico (81%). Portanto, quando comparado com outros meses, em setembro há a maior chegada de radiação solar e maior perda de radiação de onda longa.

A Análise de Cluster dos poluentes atmosféricos possibilitou a identificação de grupos de estações da RMSP que apresentam os

mesmos padrões, como por exemplo, estações que por estarem localizadas em áreas comerciais com alto tráfego de veículos, e áreas industriais com intensas emissões, compõem um mesmo grupo, como observado para o CO: os grupos 2 (Pinheiros e Taboão da Serra) e 3 (P. Pedro II, São Caetano do Sul e Cerqueira Cezar). Da mesma maneira, que estações localizadas em áreas residenciais com uma maior presença de vegetação e menor circulação de veículos correspondem ao mesmo grupo, como o grupo 1 para o NO_x (Ibirapuera; IPEN-USP; Mauá e Parelheiros).

Dentre os agrupamentos dos poluentes atmosféricos, destaca-se o comportamento do grupo composto pela estação de Congonhas para o CO e o NO_x, que apresenta as maiores concentrações de ambos os poluentes devido às emissões veiculares e às emissões derivadas de aeronaves. Também se destaca a formação dos clusters para o Ozônio, onde ficou evidenciado que o grupo com a maior concentração corresponde ao grupo cujas estações, Ibirapuera e IPEN-USP (Grupo 3) mesmo sendo localizadas em regiões vegetadas, são áreas propícias à maior formação e concentração do O₃.

4 INTERAÇÃO DA ICU E POLUENTES ATMOSFÉRICOS: ANÁLISE OBSERVACIONAL

4.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise da interação do fenômeno da ilha de calor urbana com os poluentes atmosféricos na RMSP realizada através da utilização de dados observados. Para tal, alguns critérios no tratamento da base de dados observados foram abordados e adaptados em relação aos apresentados nos capítulos anteriores. A descrição com os ajustes realizados é apresentada nas seções subsequentes.

4.2. Material

4.2.1. Dados

Os dados usados neste capítulo são provenientes das observações das estações meteorológicas e de qualidade de ar, que estão distribuídas na RMSP e foram descritas no capítulo 3 (Figuras 3.6 e 3.7). Para a intensidade da ICU foi utilizada a definição apresentada na Seção 3.4.4, na qual, a IICU de referência é estimada pelo caso 1 (diferença da temperatura horária entre as estações São Caetano do Sul (urbana) e Parelheiros (rural)).

Nesse capítulo, alguns critérios e ajustes foram adotados, de modo que fosse possível realizar a análise da interação da ICU com a qualidade do ar. Um desses critérios está associado ao conjunto de dados de poluentes, todas as estações foram incluídas na análise, exceto a estação de Parelheiros. Optou-se pela exclusão dos dados de Parelheiros, por ser a estação localizada no ponto mais distante da RMSP e estar fora da área urbana, dessa forma, seus dados podem ocasionar uma tendência de redução na concentração de poluentes da área urbana.

Outro critério adotado no manuseio dos dados corresponde à utilização dos horários de máxima ocorrência dos poluentes. Esse critério foi definido a partir do estudo de FREITAS (2003), que evidenciou que existe

uma relação positiva em fase apenas entre os máximos de ICU e os máximos de concentrações de CO e PM10. De modo que, quando a ilha de calor foi mais intensa, houve um aumento na concentração do CO e do PM10. Portanto, nesse estudo a interação da ICU com os poluentes atmosféricos é avaliada apenas nos dados dos horários de máximos.

4.2.2. Período de estudo e filtragens

A escolha do período de estudo foi determinada a partir dos resultados encontrados na análise do padrão temporal da ICU no período de 2002-2011, discutido no capítulo 3, no qual foi demonstrado que a máxima intensidade da ICU ocorre na primavera. Adicionalmente, o período de estudo também tem como referência o trabalho de Ferreira et al. (2012). Para completar um número de amostras suficientemente robusta, o período escolhido foi os meses da primavera de 2010 e 2011.

Para remover as influências das condições de grande escala e demonstrar a existência da relação da ICU com a qualidade do ar sem qualquer eventual perturbação, outro critério empregado é a utilização dos dados sobre um mesmo padrão sinótico. Portanto, para eliminar os efeitos de escala sinótica, o período de estudo escolhido deve estar sob o predomínio sinótico de um sistema de alta pressão. Sendo assim, alguns métodos de filtragem foram aplicados aos dados.

No primeiro método de filtragem, excluíram-se dias com a presença ou incursão de frentes frias/sistemas frontais. Muitos estudos já demonstraram que a região Sudeste sob a presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), há uma menor penetração de sistemas frontais na região dada a configuração dos ventos de Nordeste oriundos da circulação da ASAS (FREITAS, 2003; MORAES; 2008). Assim, o predomínio da ASAS proporciona ciclos diários de temperatura do ar bem definidos com pouca interferência da nebulosidade nessa região. No período que a região Sudeste fica sob o predomínio desse sistema, a ocorrência de ventos de Sul e Sudeste é bem inferior quando comparada a outras estações do ano. Além disso, há comumente uma queda na

intensidade dos ventos, sendo verificados mais frequentemente ventos fracos de Nordeste originados por esse sistema, o que possibilita um maior desenvolvimento de circulações locais e favorece o desenvolvimento da ICU, uma vez que, ventos fortes misturam o ar das regiões urbanas com o ar das regiões rurais.

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram a ocorrência de sistemas frontais nos meses correspondentes à primavera dos anos de 2010 e 2011.

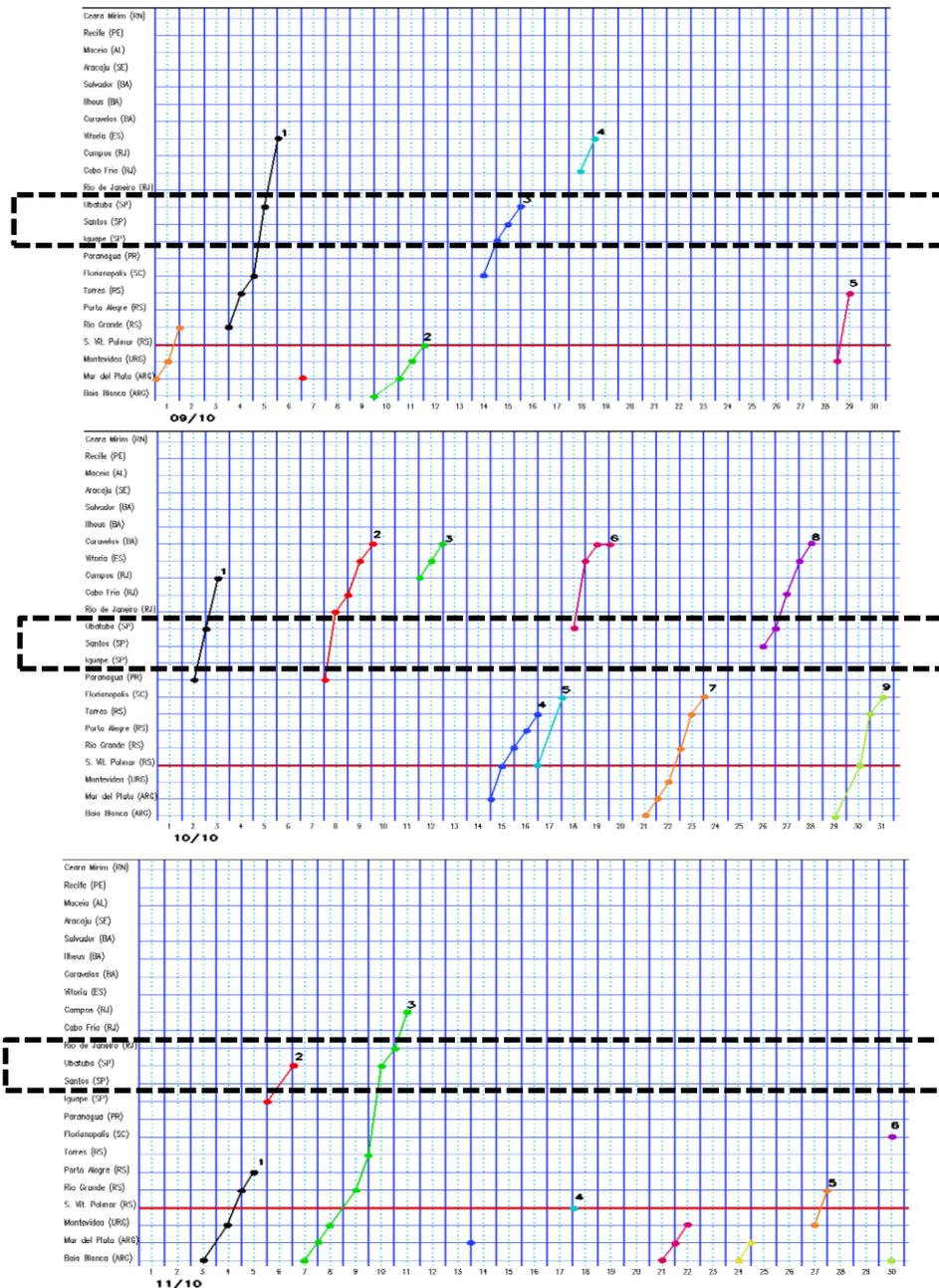


Figura 4.1 - Ocorrência de sistemas frontais na área de estudo nos meses da primavera de 2010.

Fonte: Boletim Climanálise (CPTEC/INPE).

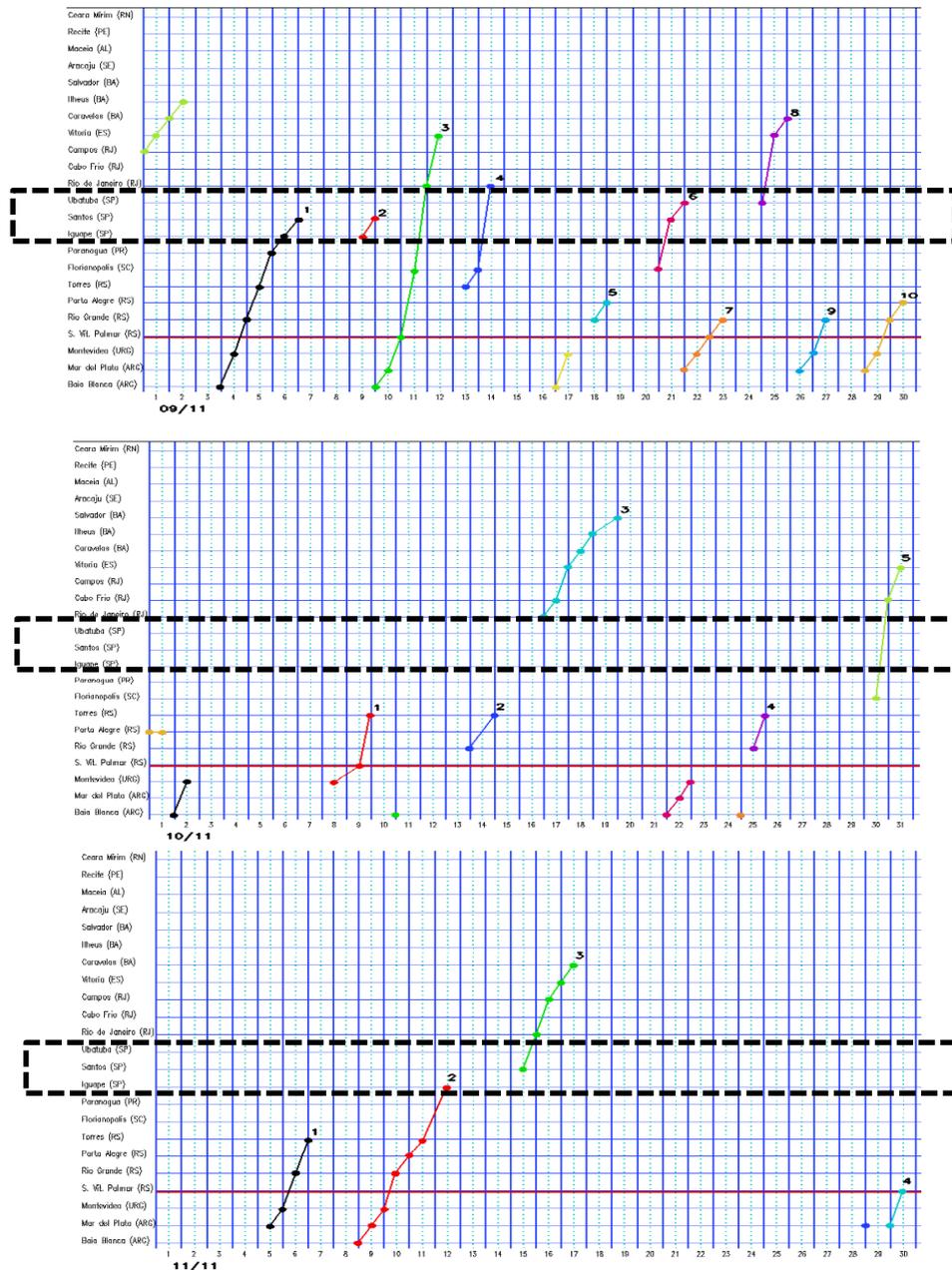


Figura 4.2 - Ocorrência de sistemas frontais na área de estudo nos meses da primavera de 2011.

Fonte: Boletim Climanálise (CPTEC/INPE).

No segundo método de filtragem, removeram-se os dias correspondentes aos finais de semana e feriados, por se tratar de dias em que há uma redução do número de veículos e no consumo de energia, e que consequentemente, pode acarretar na redução da intensidade de ICU e redução nas emissões dos poluentes. Por fim, no terceiro método de filtragem, excluíram-se os dias com nebulosidade.

Previamente, antes de iniciar as discussões sobre a interação da ICU e os poluentes, nas Figuras 4.3 a 4.7 são apresentadas uma caracterização dos ciclos diurnos médios da ICU e dos poluentes atmosféricos no período de estudo (primavera (set/out/nov) dos anos de 2010 e 2011).

Na análise comparativa da intensidade da ICU dos anos de 2010 e 2011 com a média anual de 2002-2011 (Figura 4.3a) não são observadas diferenças significativas no comportamento diurno e na intensidade da ICU. A diferença mais acentuada está nos horários de ocorrência máxima da IICU. No ano de 2010 a intensidade máxima ocorre entre 15-16HL, enquanto na curva média anual de 2011 a máxima ocorre entre 14-15HL, coincidindo com a curva média anual de 2002-2011. Essa diferença anual nos horários da máxima IICU pode estar associada a fatores locais, como por exemplo, a maior quantidade de calor antropogênico liberado na atmosfera, altos valores da TSM no Oceano Atlântico próximo a costa da região Sudeste.

Na análise do ciclo diurno médio da IICU nos períodos da primavera de 2010 e 2011 (Figura 4.3 b), a primavera de 2010 apresenta valores mais baixos (cerca de 1°C as 14-16HL) que a curva média da primavera de 2002-2011. Oposto ao que é observado para a IICU em 2011, cujo máximo da IICU alcança valores de 1,5°C entre as 14-15HL, ultrapassando a curva da primavera média de 2002-2011.

Na análise do ciclo diurno médio do CO nos anos de 2010 e 2011 (Figura 4.4a) não são encontradas diferenças significativas entre os dois anos analisados. Adicionalmente, nos horários de máxima concentração desse poluente (primeiras horas da manhã e fim da tarde) o ano de 2010 apresenta valores superiores de CO (~1,3ppm) em comparação ao ano de 2011 (~1,2ppm). No período da primavera de 2010 e 2011 (Figura 4.4b) evidencia-se um comportamento diurno similar ao observado na média anual de 2010 e 2011, com discrepâncias apenas nos valores de máximo. Na primavera de 2010 e 2011 há uma queda nos valores de CO, atingindo valores da ordem de 1,2ppm e 1ppm, respectivamente.

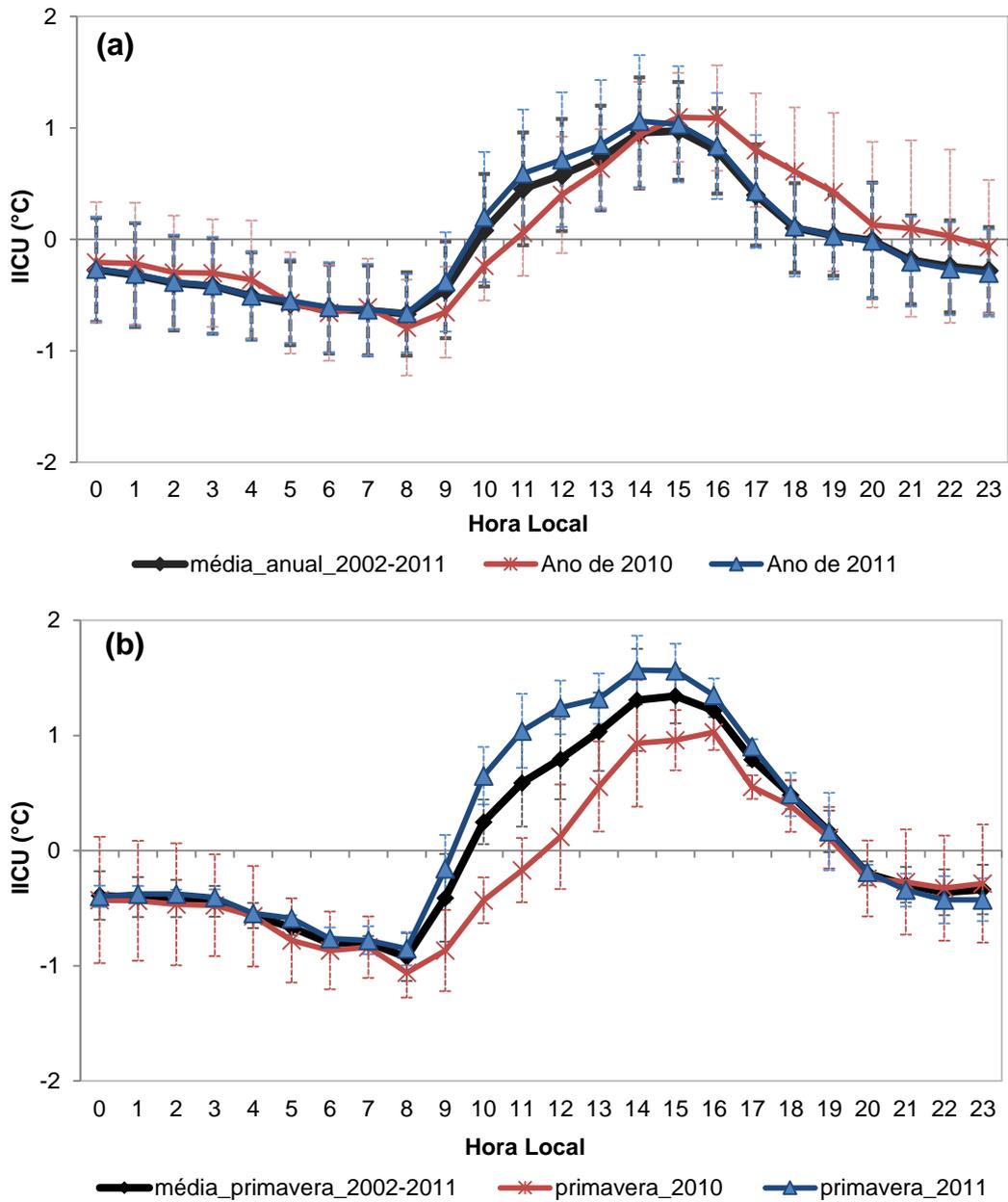


Figura 4.3 – Ciclo diurno médio da intensidade da ICU nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2002-2011 (linha preta), Janeiro-Dezembro de 2010 (linha vermelha) e Janeiro-Dezembro de 2011 (linha azul); (b) primavera de 2002-2011 (linha preta), primavera de 2010 (linha vermelha) e primavera de 2011 (linha azul).

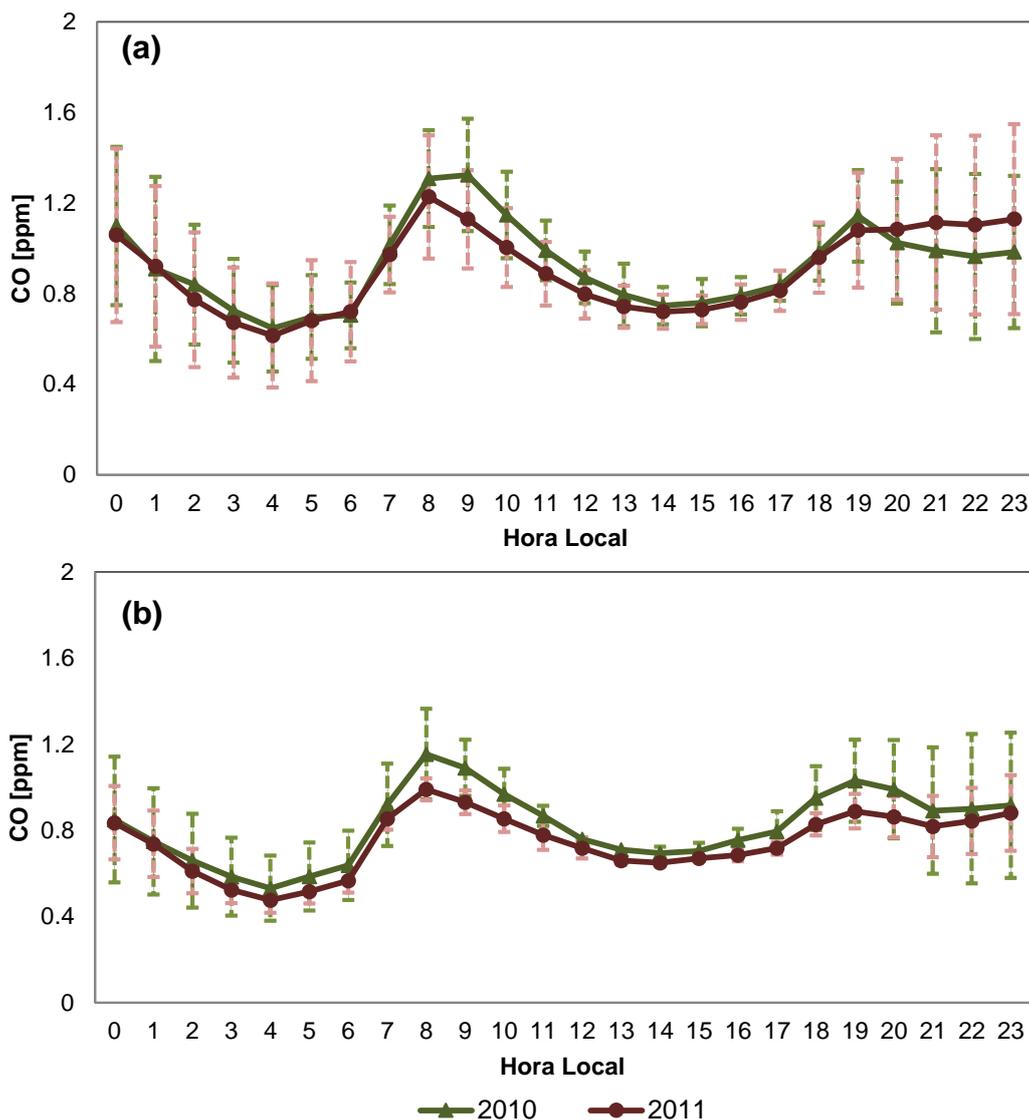


Figura 4.4 – Ciclo diurno médio do CO nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) de primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).

Na análise do ciclo diurno médio do NO_x nos anos de 2010 e 2011 (Figura 4.5 a), são verificadas as maiores concentrações de NO_x no horário de máximas para o ano de 2010 (cerca de 104ppb) em relação ao ano de 2011 (91ppb). O mesmo padrão é encontrado na primavera de 2010 (Figura 4.5b), valores de NO_x mais altos (~87ppb) que a primavera de 2011 (~71ppb). Contudo, uma diferença que se destaca é a redução da concentração de NO_x entre a análise anual e sazonal. Para 2010, no período da manhã, a máxima anual de NO_x é de cerca de 104ppb,

enquanto a máxima na primavera é de 87ppb. Em 2011, a concentração média anual foi de 91ppb e a concentração na primavera foi 71 ppb. O que evidencia que mesmo menor a taxa de emissão de NO_x na primavera apresentam valores médios de emissão similares a emissão anual do NO_x.

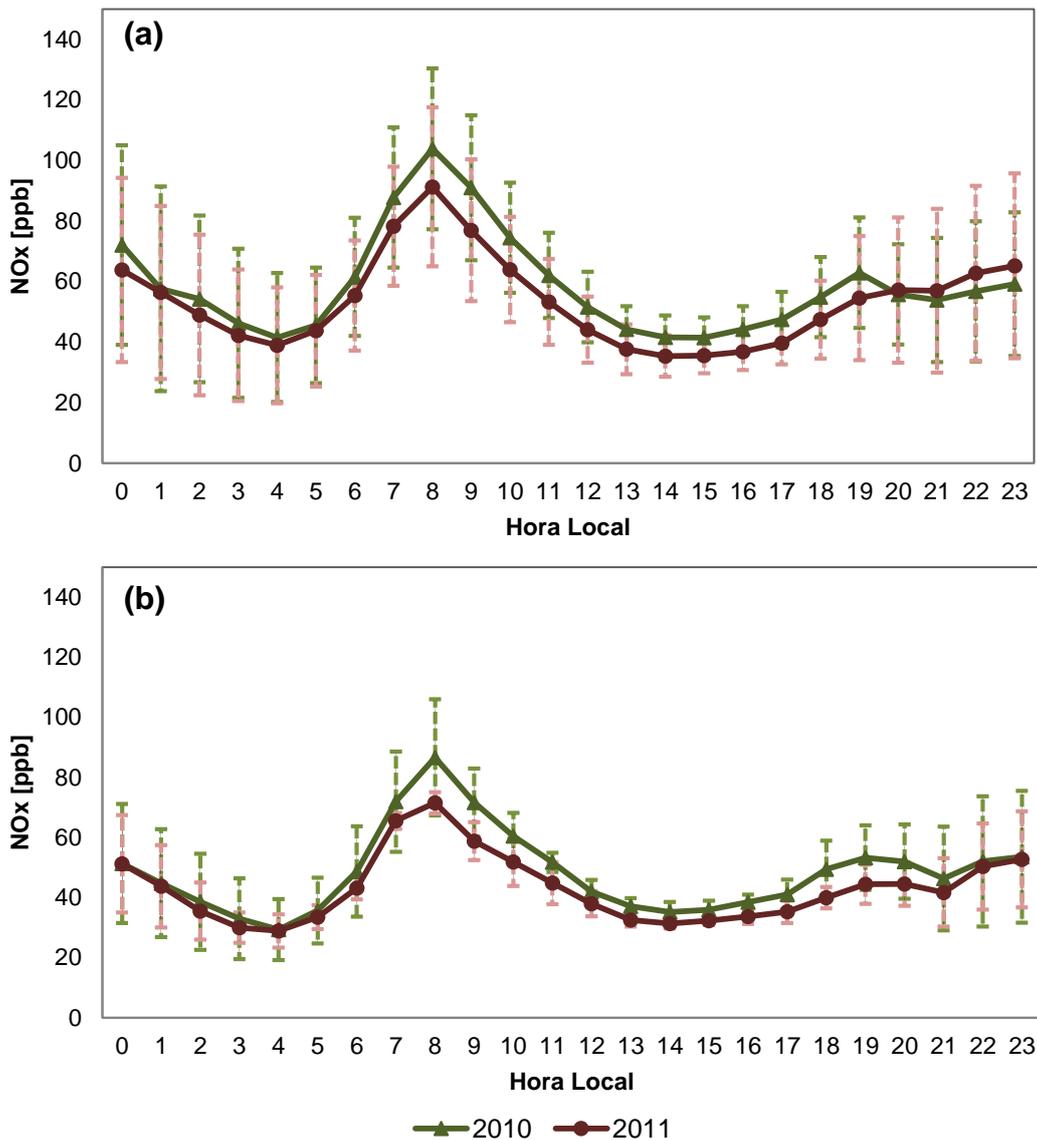


Figura 4.5 – Ciclo diurno do NO_x nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).

Na análise do ciclo diurno do ozônio nos anos de 2010 e 2011 não há diferença significativa entre os dois anos (Figura 4.6 a), os horários da máxima concentração do O₃ ocorrem no início e meio da tarde, cerca das

14-15HL. Porém, quando analisado o comportamento médio da primavera entre os anos (Figura 4.6b) é perceptível um ligeiro aumento do valor do O₃ em 2011 (~54ppb) em relação a 2010 (~50ppb) no horário de pico. Esse aumento da taxa de O₃ em 2011 eventualmente está relacionada a seus poluentes precursores (NO_x e COVS), assim como as condições meteorológicas.

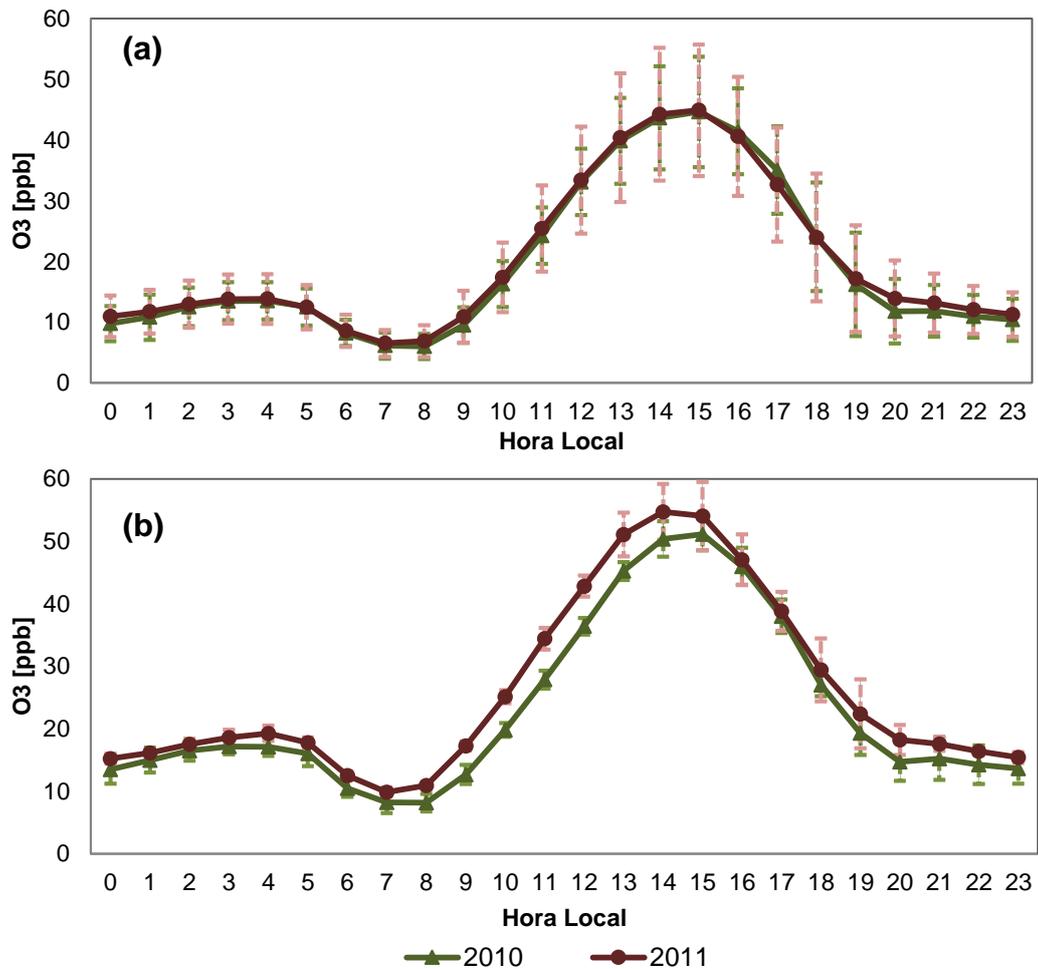


Figura 4.6 – Ciclo diurno médio do O₃ nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).

O padrão de material particulado (PM₁₀) na atmosfera não difere entre os anos de 2010 e 2011, uma ligeira diferença encontrada está relacionada aos valores de máxima, os quais são mais altos ao longo do ciclo diurno em 2010 (Figura 4.7a). Da mesma forma esse comportamento é

observado na primavera de 2010 (Figura 4.7b) em relação à primavera de 2011.

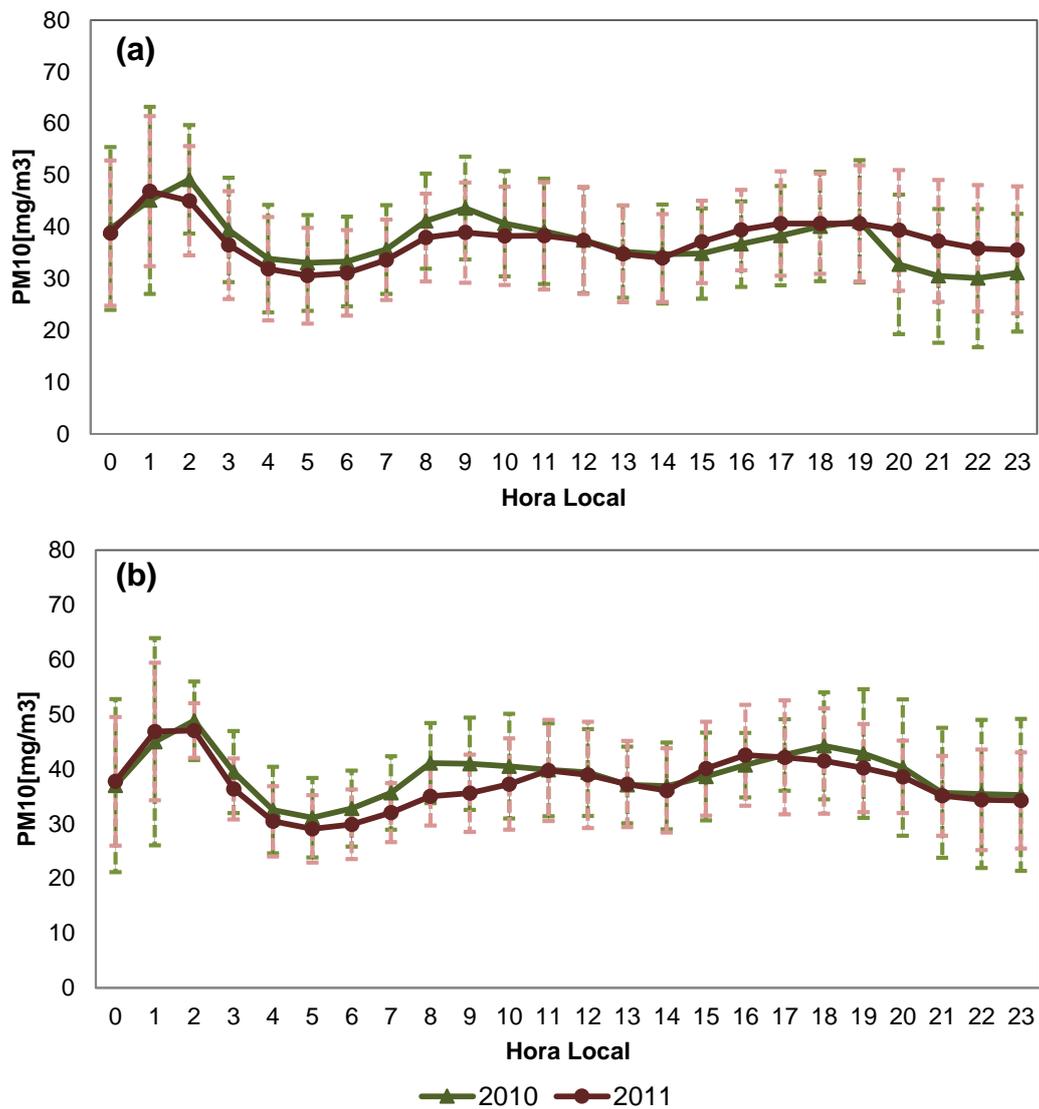


Figura 4.7 – Ciclo diurno médio do PM10 nos períodos de (a) Janeiro-Dezembro de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha) e (b) primavera (set/out/nov) de 2010 (linha verde) e de 2011 (linha vermelha).

4.3. Métodos

Nos métodos de análise dois modos são empregados para investigar a interação da ICU com os poluentes atmosféricos. No primeiro método, é realizada uma análise qualitativa da dispersão dos dados observados da concentração dos poluentes com os valores correspondentes de

intensidade da ICU. No segundo método é utilizada a técnica estatística de comparação de médias destas mesmas variáveis.

Os testes de comparações de médias são usados para detectar diferenças entre os tratamentos, quando o objetivo é comparar tratamentos qualitativos e verificar se existe diferença significativa entre contrastes ortogonais dos tratamentos. Dentre esses testes, destacam-se os testes de Tukey, Duncan, Dunnett e o teste LSD. Adicionalmente, esses testes são utilizados, pois permitem mostrar, especificadamente, quais tratamentos diferem, ou não, estatisticamente (SOUZA et al., 2012).

Neste estudo, o método de comparação de média utilizado foi o teste de Duncan. Esse teste é uma metodologia amplamente usada para comparação de pares de médias, sendo desenvolvido por Duncan (1955). O teste de Duncan é utilizado para testar todo e qualquer contraste entre duas médias, sua principal limitação é não permitir comparar grupos de médias entre si. Ele é baseado nas várias Diferenças Mínimas Significativas (D.M.S), que é obtido pela equação (4.1):

$$DMS = D_l = q_{\alpha(i;g)} \sqrt{\frac{QM. Resíduo}{r}} \quad (4.1)$$

Sendo que: $i = p + 2$, onde p o número de médias existente entre as duas médias comparadas na relação decrescente. Após a ordenação das médias, qualquer diferença entre pares maior do que respectiva diferença mínima significativa (DMS) resultará em um valor significativo no nível de significância α . A principal vantagem do teste de Duncan em relação a outros testes de comparação de médias está associada a seus resultados, os quais se apresentam são mais detalhados e discriminam-se com mais facilidade entre os tratamentos, portanto, o teste de Duncan indica resultados significativos em casos que outros testes não permitem obter significação estatística (OLIVEIRA, 2008). Desta forma, optou-se por usar este método de comparação de médias.

O resultado do teste de Duncan exhibe se as médias dos tratamentos se diferem estaticamente entre si, de modo que, se as médias são seguidas

pela mesma letra, esses tratamentos não diferem significativamente entre si. O teste de Duncan ao nível de significância de 5% foi aplicado nos dados médios de ICU e dos poluentes atmosféricos nos períodos da primavera de 2010 e 2011.

4.4. Resultados

4.4.1. Primeiro método

Nesse primeiro método de abordagem foram analisadas as distribuições das concentrações máximas dos poluentes com os valores correspondentes das intensidades máximas da ICU. Mesmo utilizando os valores dos horários de máxima ocorrência, com esta metodologia é possível associar e identificar os valores de IICU que correspondem às maiores concentrações de poluentes.

Nas Figuras 4.8(a) e 4.8(b) são apresentadas os gráficos de dispersão dos valores de máxima concentração de CO observadas em diferentes estações, com seus respectivos valores de intensidade da ICU, para a primavera de 2010 e 2011, respectivamente. De uma maneira em geral, é evidenciado que, para valores de $IICU < 2^{\circ}C$, a máxima concentração de CO, em média é da ordem 3ppm, alcançando valores de até 5ppm em 2010. Entretanto, com o aumento da IICU, $2^{\circ}C < IICU < 4^{\circ}C$, as concentrações de CO atingem em maior frequência valores superiores a 4ppm. No caso particular como o ano de 2010, nos intervalos de IICU acima de $4^{\circ}C$ são encontradas concentrações de CO até mais altas (~5ppm), porém, em média para ambos os anos, os valores de CO mantêm-se abaixo de 4ppm.

Adicionalmente, para o ano de 2010 são observados intervalos de IICU entre $7^{\circ}C$ a $8^{\circ}C$, cujos valores associados de CO estão abaixo de 3ppm. Demonstrando que a concentração de CO apresenta uma relação marcante com a ICU para valores específicos de intensidades. Para valores de IICU entre $2^{\circ}C < IICU < 5^{\circ}C$, a concentração de CO aumenta com a intensidade da ICU, mas em contrapartida, para valores de $IICU > 6^{\circ}C$, a concentração de CO não exhibe valores significativos.

Portanto, para a distribuição de CO é observada que a concentração mantém-se baixa até um valor de corte (IICU=2°C), depois desse limite a concentração aumenta, mas ao atingir certo ponto (IICU>6°C) a concentração do CO já não demonstra dependência com a IICU.

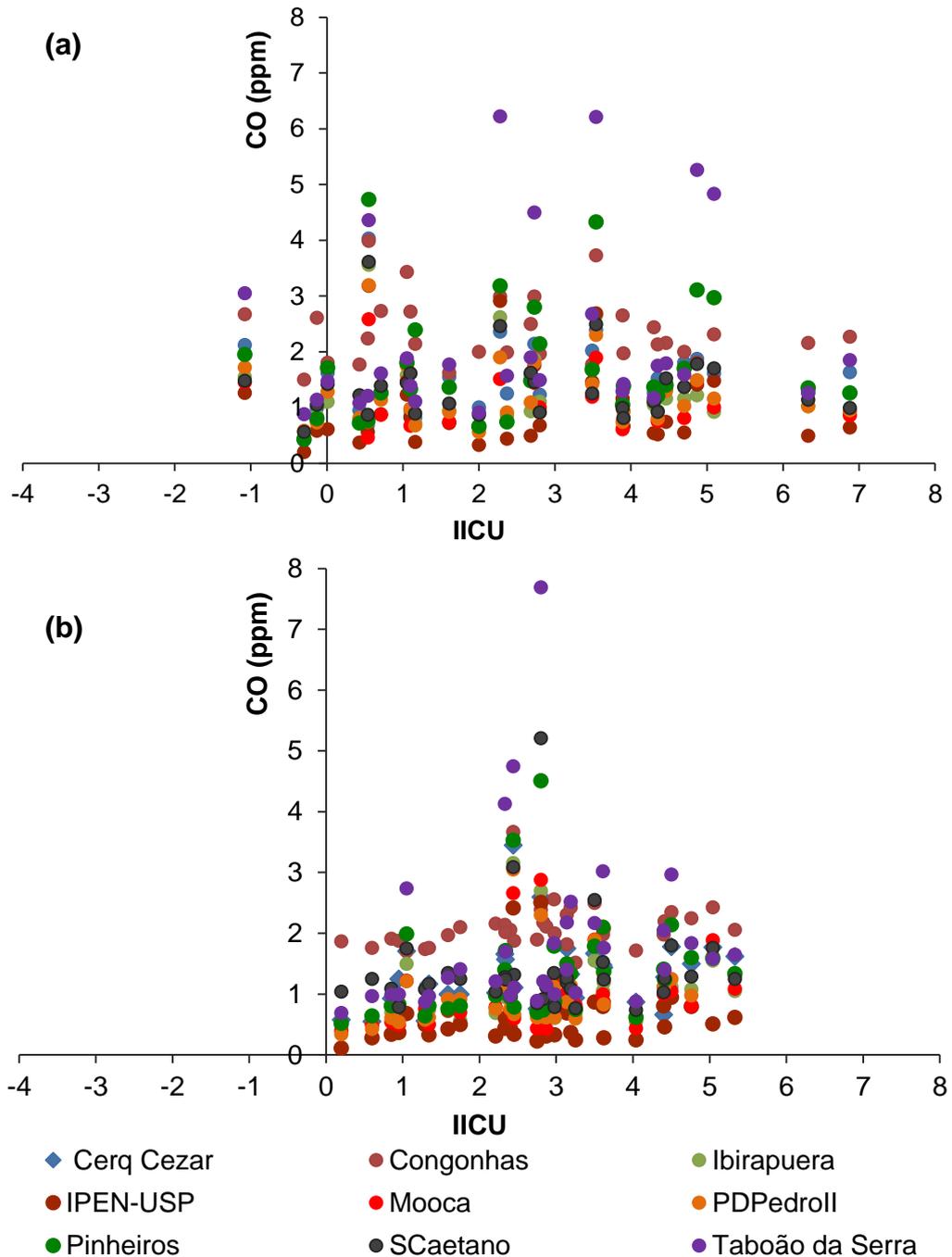


Figura 4.8 – Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do CO (ppm) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.

Na dispersão dos valores de concentração máxima de O_3 com os respectivos valores de IICU na primavera de 2010 e 2011 (Figura 4.9a e 4.9b), é evidenciado claramente que as maiores concentrações de O_3 (valores superiores a 80ppb) ocorrem com IICU superiores a $2^\circ C$, principalmente na primavera de 2010 (Figura 4.9a). A partir desse limite, $IICU > 2^\circ C$, são encontrados valores de O_3 de 140 ppb a 160ppb na primavera de 2011 (Figura 4.9b). Para valores de $IICU > 6^\circ C$ há uma redução da concentração do O_3 , porém estes ainda permanecem altos (~ 80ppb a 100ppb). Tal comportamento evidencia o aumento da concentração de O_3 com maiores valores de IICU.

Esses resultados concordam com estudos que demonstraram que ozônio na superfície tende a ser maior em dias quentes (HE et al, 2013) e que a temperatura pode ser usada como um substituto para os fatores meteorológicos que influenciam a formação de O_3 na superfície (JACOB et al., 1993; RYAN et al., 1998; CAMALIER et al., 2007; BLOOMER et al., 2009). Alguns processos explicam o aumento do ozônio na superfície em dias quentes, como por exemplo, o aumento das emissões antropogênicas e biogênicas dos Compostos Orgânicos Voláteis que aquecem a baixa atmosfera, a correlação de subsidência, estagnação do vento e a radiação UV (aumento das taxas de fotólise) com as condições meteorológicas associadas com alta temperatura (MICKLEY et al., 2004).

Na análise da dispersão dos valores de concentração máxima de NO_x com os valores de intensidade da ICU (Figura 4.10a e 4.10b) são observadas concentrações baixas e intermediárias de NO_x , em média da ordem de 150ppb a 20 ppb para $IICU < 2^\circ C$, embora na primavera de 2010 são verificados valores de até 300ppb (Figura 4.10a). No entanto, se observa principalmente na primavera de 2011 (Figura 4.10b), que para valores de IICU entre $2^\circ C$ e $5^\circ C$, altas concentrações de NO_x são encontradas, atingindo valores entre 400ppb e 600ppb. Esse comportamento demonstra que a concentração de NO_x também apresenta uma relação positiva com a IICU.

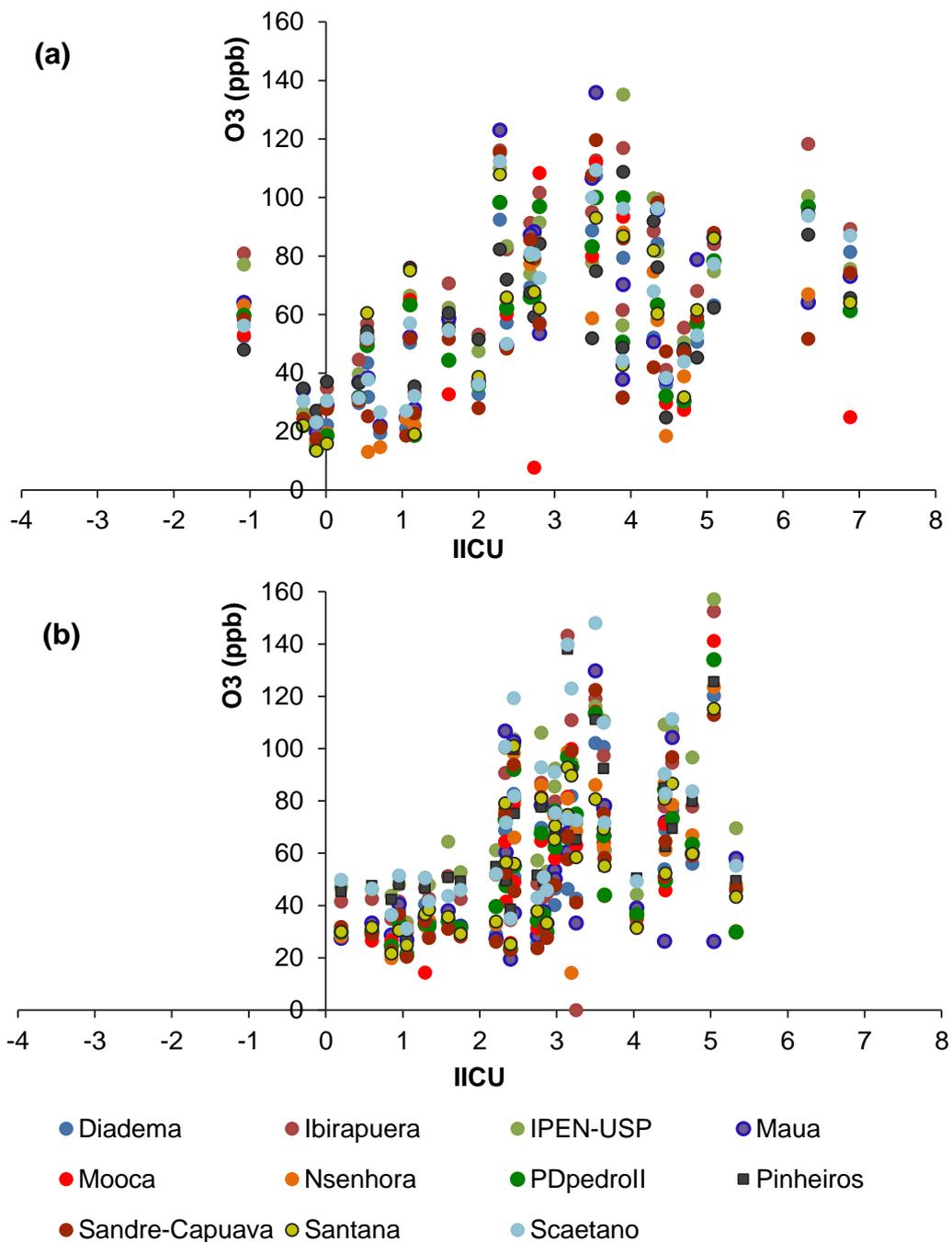


Figura 4.9 – Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do O₃ (ppb) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.

Contudo, para IICU maiores (IICU>6°C), os valores das máximas concentrações do NO_x diminuem (~ 200 ppb) em comparação aos outros valores de IICU. Esse padrão coincide com o que foi observado na distribuição do CO, em que é evidenciado que IICU baixas (IICU<2°C) não são associadas com altas concentrações de poluentes (CO e NO_x),

mas à medida que atinge o valor de corte (IICU=2°C), as concentrações aumentam até atingirem um valor de IICU=5°C, no qual essas concentrações já não aumentam, mas, a partir daí, caem.

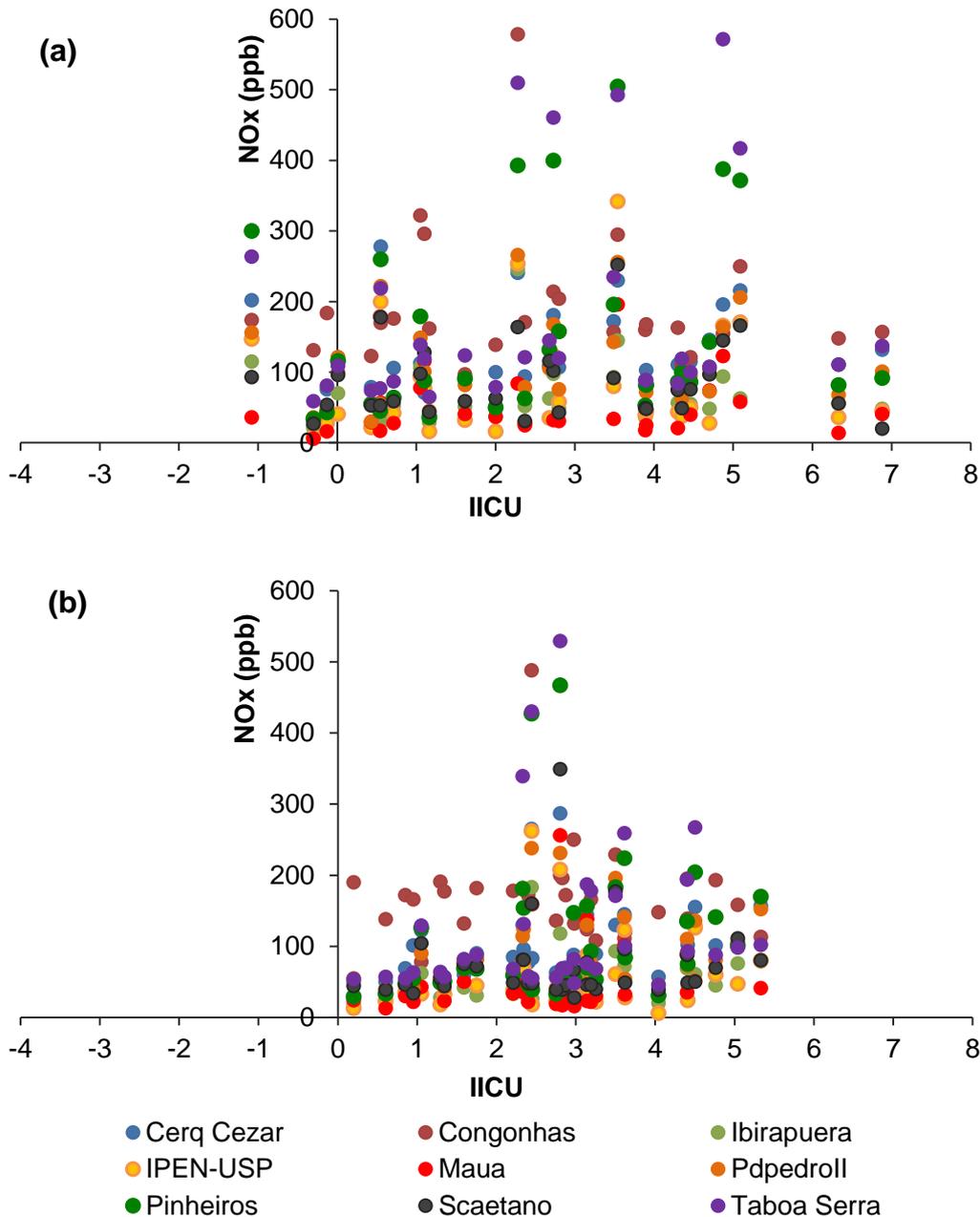


Figura 4.10 - Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do NO_x (ppb) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.

Essa relação positiva entre a IICU e a concentração de NO_x é coerente com trabalhos que apontaram a existência de uma sensibilidade da temperatura do ar com as emissões NO_x. No estudo de He et al. (2013)

foi demonstrado que emissões antropogênicas de NO_x podem variar com a temperatura. Dias quente de verão foram frequentemente associados com aumento de emissões de NO_x provenientes das usinas para atender a maior demanda de energia elétrica no consumo de ar-condicionado. Grande parte deste aumento das emissões diárias de NO_x pode estar atribuído a menor regulamentação nas usinas durante o período de picos para atender à demanda excessiva do consumo de energia. O estudo de Singh; Sloan (2006) relataram casos em que as emissões veiculares de NO_x aumentam ligeiramente, cerca de $1\%/^{\circ}\text{C}$, entre 20°C e 35°C .

Na distribuição da concentração máxima de PM_{10} com a IICU (Figura 4.11a e 4.11b), assim como nos demais poluentes apresentados, também é observado um padrão de baixos valores de PM_{10} (não ultrapassam a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) até $\text{IICU} < 2^{\circ}\text{C}$.

Para $\text{IICU} > 2^{\circ}\text{C}$, em ambas as primaveras são encontradas concentrações de PM_{10} elevadas, superiores a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Portanto, uma relação positiva entre a IICU e a concentração de PM_{10} também é observada. Porém, para IICU entre 6°C e 7°C (Figura 4.11a) os valores de PM_{10} mantêm-se na ordem de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. O que evidencia, assim como verificado para os outros poluentes, uma relação de dependência somente em valores específicos de IICU.

Os resultados apresentados nos gráficos de dispersão demonstram uma relação positiva entre os altos valores da IICU e as altas concentrações dos poluentes, apesar das situações em que a IICU apresenta valores elevados (como por exemplo, $\text{IICU} > 6^{\circ}\text{C}$), mas que essa interação parece ainda ser questionável.

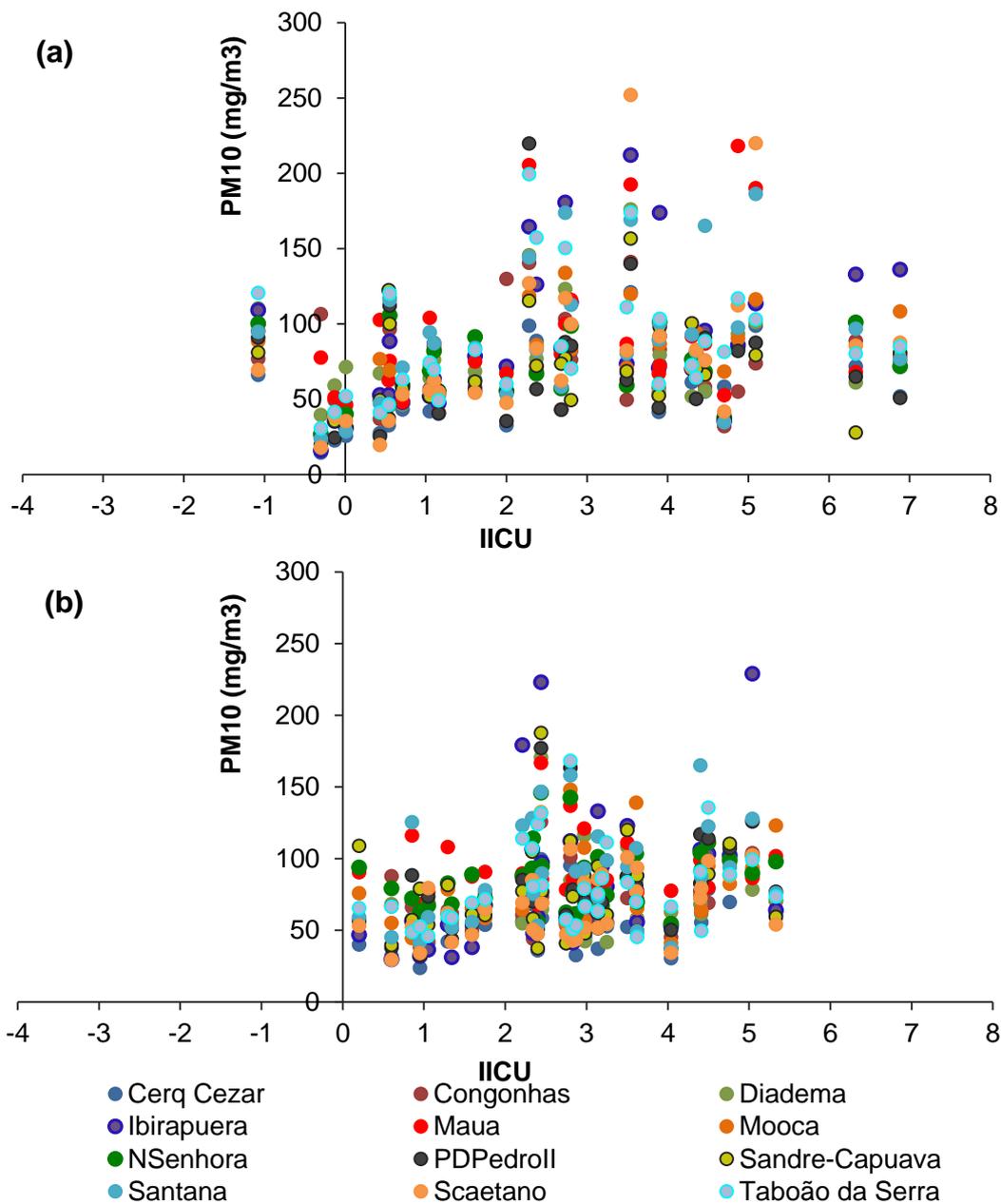


Figura 4.11 - Gráfico da dispersão dos valores de máxima concentração do PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e de IICU para a primavera de (a) 2010 e de (b) 2011.

Dessa forma, com a finalidade de reafirmar os resultados dos efeitos combinados da ICU e da qualidade do ar também é realizada uma análise da distribuição da concentração de poluentes agrupados em diferentes intervalos da IICU. Essa análise permite avaliar a tendência do comportamento dos poluentes em cada nível de intervalo da IICU, no qual cada nível representa intervalos com intensidades distintas da ICU,

os níveis considerados são os seguintes: nível 1 ($IICU < 0^{\circ}C$), nível 2 ($0^{\circ}C < IICU < 1^{\circ}C$), nível 3 ($1^{\circ}C < IICU < 2^{\circ}C$), nível 4 ($2^{\circ}C < IICU < 3^{\circ}C$) e nível 5 ($IICU > 4^{\circ}C$).

Os resultados são apresentados para a primavera de 2010 e 2011 separadamente e para as duas primaveras juntas. Com a análise da combinação das duas primaveras (primavera 2010+2011) é possível caracterizar com mais robustez a relação da IICU com os poluentes atmosféricos.

Na Figura 4.12 apresenta-se a distribuição do CO e do PM10 para os 5 níveis de IICU na primavera de 2010, primavera de 2011 e para as duas primaveras combinadas. A distribuição do CO para os três períodos (Figura 4.12 (a), (b) e (c)) indicam uma tendência de aumento da concentração do CO com a intensificação da ICU. Para a primavera de 2010 (Figura 4.12a), parecem existir dois padrões de tendência de aumento da concentração do CO. No primeiro padrão, é observado uma ligeira subida do CO do nível 1 para o nível 2, seguida de uma queda do nível 3. No segundo padrão é estabelecido uma tendência de elevação do CO do nível 3 para os níveis 4 e 5. Para a primavera de 2011 (Figura 4.12b), não é observado valores negativos de IICU, por isso o nível 1 ($IICU < 0^{\circ}C$) é vazio. No entanto, é identificado uma nítida tendência de elevação do CO com o aumento dos níveis de IICU, porém com um suave queda no nível 5 ($IICU > 3^{\circ}C$).

Na análise da primavera de 2010 e 2011 combinadas (Figura 4.12c), não são tão evidentes a identificação de uma fase positiva da concentração do CO com a ICU. Os padrões observados na primavera de 2010 parecem se repetir na análise das primaveras de 2010+2011, para os primeiros níveis (nível 1 e 2) há um suave acréscimo da concentração do CO. No segundo padrão, a tendência de elevação ocorre nos níveis 3, 4 e 5, os quais coincidem com o resultado descrito anteriormente na distribuição da concentração de CO para os valores de IICU (Figura 4.8). Adicionalmente, um aspecto importante é observado na concentração do CO com os níveis de IICU, o nível 5 apesar de apresentar um aumento

em relação ao nível 4, o valor médio (barra central do *boxplot*) é similar ao valor médio do nível 4, o que demonstra, portanto, uma estagnação da concentração do CO.

Dessa forma, os resultados da distribuição da concentração de CO com a IICU demonstram que assim como discutidos nos resultados anteriores, há um aumento da concentração com a intensificação da IICU, mas a partir de um determinado nível de IICU não é mais evidenciado alteração na concentração do CO (ou seja, há a estagnação).

Na concentração do PM₁₀ para os diferentes níveis de IICU (Figura 4.12 (d), (e), (f)) é observado o aumento da concentração de PM₁₀ com a intensificação da IICU. No qual concorda com os resultados encontrados em Freitas (2003), que identificou que quando a ilha de calor foi mais intensa houve um aumento na concentração do PM₁₀.

A concentração do NO_x para os 5 níveis de IICU são mostrados nas Figuras 4.13. Na primavera de 2010 (Figura 4.13a) e na primavera de 2011 (Figura 4.13b), são encontrados o padrão de tendência de elevação de NO_x com a intensificação da IICU, porém, a partir no nível 5 a tendência da concentração de NO_x parece estagnar-se. Ao oposto da primavera de 2010 e 2011, na primavera de 2010+2011 (Figura 4.13c) o aumento do NO_x com a IICU não é evidente. É observado nos três primeiros níveis (nível 1, 2 e 3) uma estagnação da concentração do NO_x, e a partir do nível 4 e 5 há o aumento mais significativo do NO_x com a IICU.

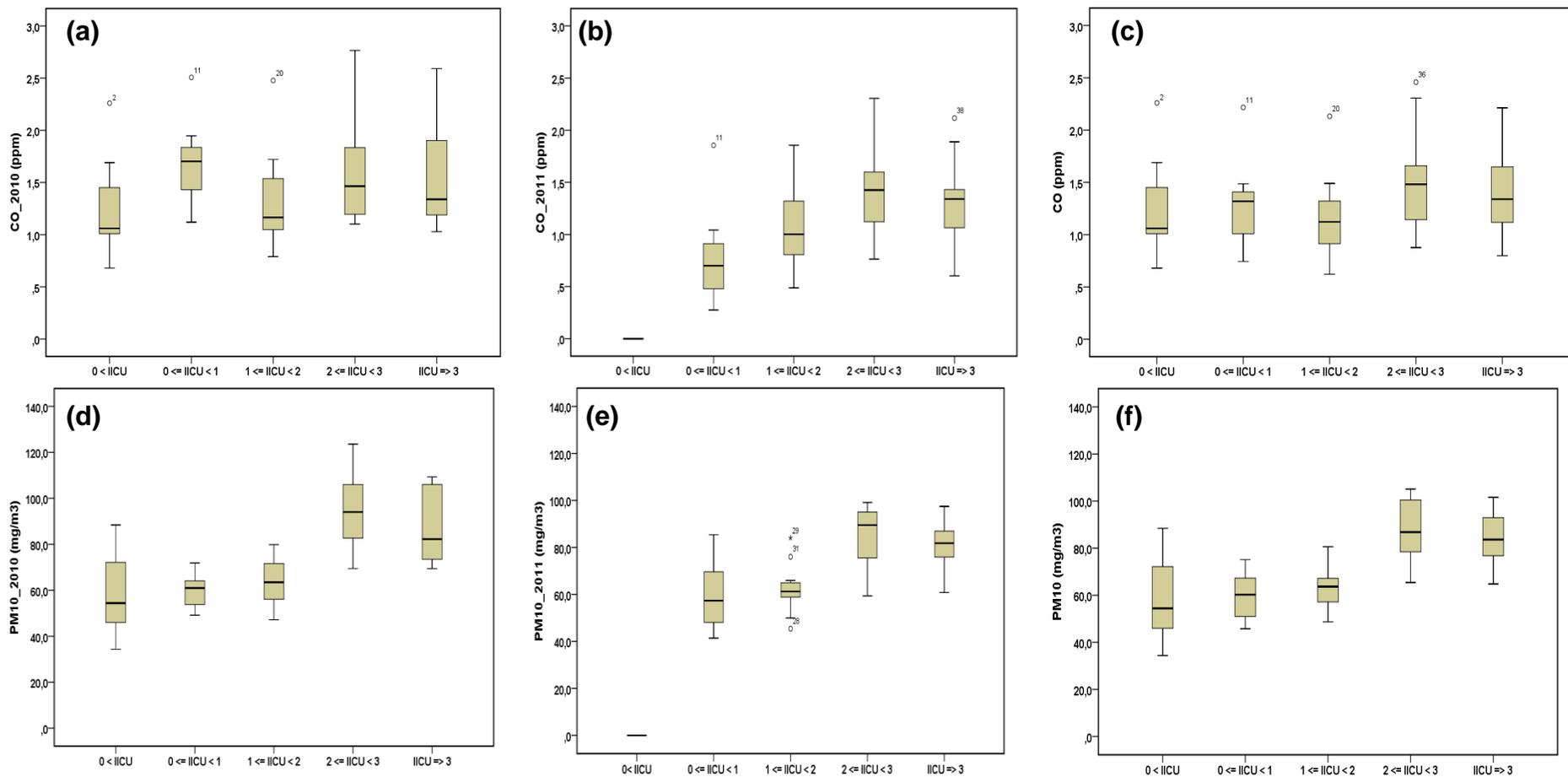


Figura 4.12 – Taxa de concentração de CO em diferentes níveis de ICU para o período de: (a) primavera de 2010, (b) primavera de 2011 e (c) primavera de 2010+2011; Taxa de concentração do PM10 em diferentes níveis de ICU para o período de: (d) primavera de 2010, (e) primavera de 2011 e (f) primavera de 2010+2011.

Na tendência de elevação da concentração do O₃ para os três períodos (Figura 4.13 (d), (e) e (f)) são evidentes a interação positiva da concentração do O₃ com a IICU. Contudo, dois casos destacam-se, o nível 1, que parece ter uma concentração de O₃ ligeiramente menor que o nível 2. E o nível 5 que apresenta uma concentração semelhante ao nível 4, indicando que pode haver uma estagnação da concentração do O₃ nesse último nível. Mas, de qualquer forma, o valor de concentração do O₃ no nível 5, ratifica o foi encontrado nos resultados da Figura 4.9, o quais em que IICU>6°C há uma queda na concentração do O₃.

Os resultados das análises nesse primeiro método de abordagem se complementam e reafirma-se entre si. De maneira geral, os resultados mostram que o O₃ e PM10 são os poluentes que apresentam uma interação bem estabelecida com a IICU, o comportamento das concentrações do O₃ e do PM10 apresenta uma relação positiva com a intensificação da ICU. De modo que, ICU mais intensas acarreta no aumento da concentração desses poluentes. Para os demais poluentes, CO e NO_x, os resultados demonstram que há uma suave tendência de elevação nos primeiros níveis da IICU, posterior a um certo nível de IICU há uma estagnação, ou seja, a concentração do CO e do NO_x não se alteram, mesmo para ICU mais intensa.

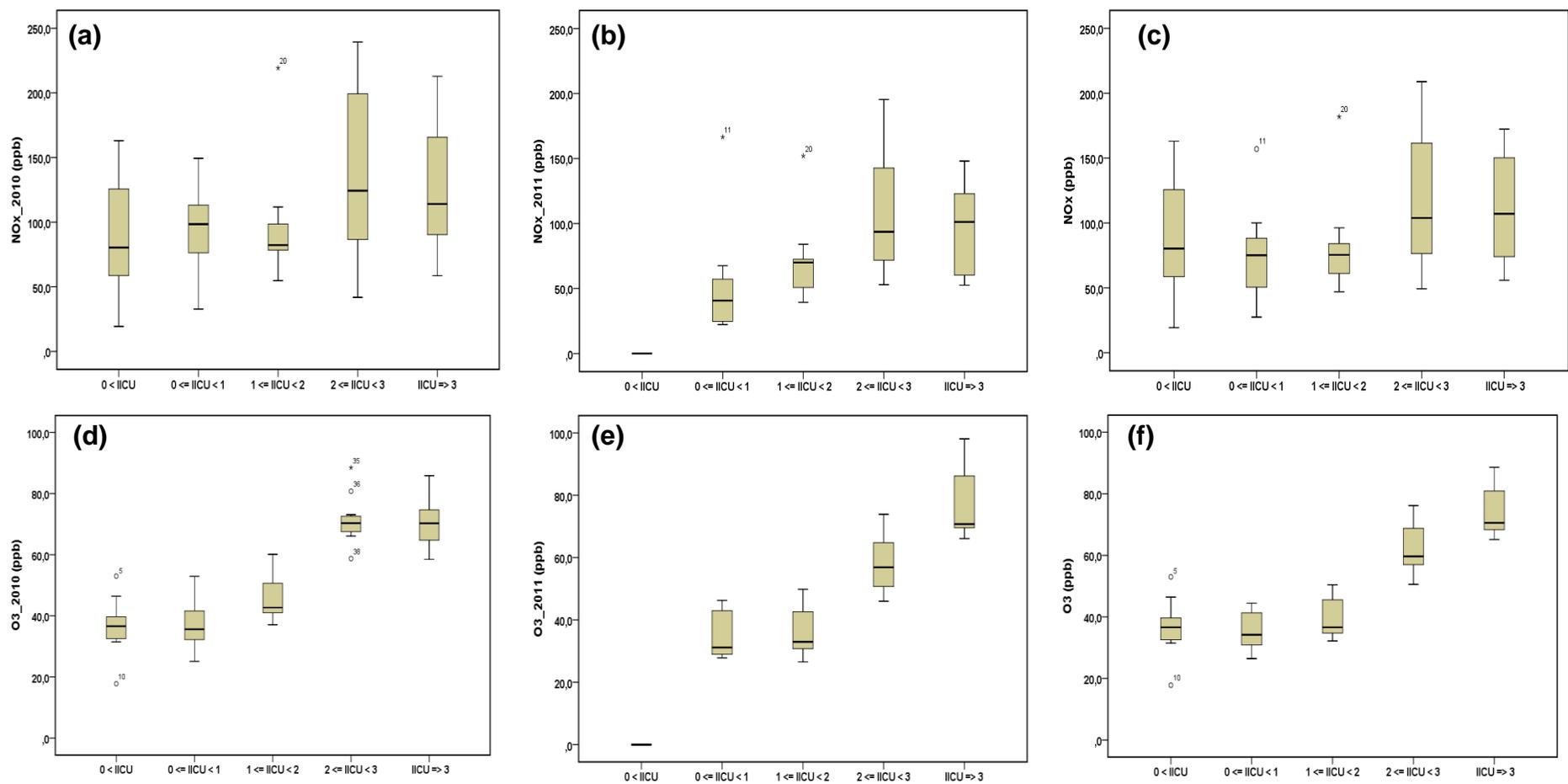


Figura 4.13 – Taxa de concentração de NO_x em diferentes níveis de ICU para o período de: (a) primavera de 2010, (b) primavera de 2011 e (c) primavera de 2010+2011; Taxa de concentração do O₃ em diferentes níveis de ICU para o período de: (c) primavera de 2010, (d) primavera de 2011 e (e) primavera de 2010+2011.

4.4.2. Segundo método

Nesta seção são apresentados os resultados do teste de média de Duncan, que atesta quantitativamente a interação da ilha de calor com a concentração dos poluentes. O teste de Duncan comprova estatisticamente se as médias da concentração dos poluentes são significativamente iguais ou diferentes entre si nos 5 níveis de IICU, de modo que, é possível verificar se há o aumento da concentração com a intensificação da IICU, além de associar as médias das concentrações a grupos com a mesma característica. Os resultados são apresentados para os três períodos já apresentados, primavera de 2010 e 2011, e também para a primavera de 2010+2011.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do Teste de Duncan para os três períodos, de tal forma que, a média dos poluentes está associada com cada nível de IICU. As letras/cores indicam se as médias de cada concentração em cada nível diferem ou não estatisticamente entre si.

Na análise das médias da concentração do ozônio na primavera de 2010 são observados três padrões distintos. O nível 1 e 2 apresentam valores médios similares e assim a mesma letra, o que corresponde a um mesmo grupo. O nível 3 apresenta um letra diferente dos demais níveis, e portanto, se difere das médias, enquanto o nível 4 e 5 apresentam valores médios de O_3 semelhantes (com a mesma letra) assim médias estatisticamente iguais, compondo um único grupo. Dessa forma, os resultados demonstram que mesmo que a concentração do O_3 em alguns níveis é igual, com o aumento dos níveis de IICU a concentração do O_3 aumenta.

As médias do O_3 na primavera de 2011 também demonstram o aumento dos valores médios da concentração (letras distintas entre eles), o que significa que a concentração aumenta com a intensificação da ICU, com exceção dos níveis 2 e 3 que são estatisticamente iguais entre si (portanto um mesmo grupo). Contudo, na primavera de 2011 é evidente a

existência de 3 padrões da concentração do O₃, os quais apontam o aumento da concentração com a intensificação da ICU.

Tabela 4.1 - Concentração dos poluentes para diferentes níveis de ICU na primavera de 2010, primavera de 2011 e primavera de 2010+2011.

Poluente	Período	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
O ₃ (ppb)	2010	36,34 ^a	37,06 ^a	46,41 ^b	71,35 ^c	70,25 ^c
	2011	-----	35,11 ^a	35,79 ^a	58,06 ^b	77,90 ^c
	2010+2011	36,34 ^a	35,44 ^a	39,80 ^a	62,33 ^b	74,52 ^c
CO (ppm)	2010	1,25 ^a	1,65 ^a	1,34 ^a	1,65 ^a	1,58 ^a
	2011	-----	0,79 ^a	1,07 ^{a,b}	1,33 ^c	1,48 ^{b,c}
	2010+2011	1,26 ^a	1,27 ^a	1,19 ^a	1,53 ^a	1,44 ^a
NO _x (ppb)	2010	89,07 ^a	92,73 ^a	98,31 ^a	138,05 ^b	125,17 ^{a,b}
	2011	-----	54,50 ^a	72,11 ^{a,b}	107,91 ^c	95,72 ^{b,c}
	2010+2011	89,07 ^{a,b}	75,36 ^a	83,55 ^{a,b}	117,95 ^b	109,37 ^{a,b}
PM10 (µg/m ³)	2010	58,68 ^a	59,94 ^a	63,67 ^a	95,52 ^b	87,55 ^b
	2011	-----	59,44 ^a	62,29 ^a	84,75 ^b	84,58 ^b
	2010+2011	58,61 ^a	59,76 ^a	62,92 ^a	88,45 ^b	84,38 ^b

Grupo a	Grupo b	Grupo c	Grupo a,b	Grupo b,c
---------	---------	---------	-----------	-----------

*médias seguidas pela mesma letra (ou com a mesma cor) não diferem estatisticamente entre si.

A primavera de 2010+2011 corresponde o período de resultados mais satisfatórios do teste de Duncan para o Ozônio. Pela Tabela 4.1 é claramente evidente o aumento dos valores médios de O₃, exceto para os níveis 1, 2 e 3 cujos valores são similares (letras iguais). Portanto, o resultado do teste de Duncan demonstra que os níveis 1, 2 e 3 são iguais

(não há a evolução do O₃ com a IICU), e nos níveis 4 e 5 são distintos um do outro.

O teste de Duncan para o CO no período da primavera de 2010 e na primavera de 2010+2011 revela que não há relação do CO com os níveis de IICU. Os valores das médias em todos os níveis são significativamente semelhantes (letras iguais), evidenciando que a concentração de CO não aumenta com a intensificação da IICU. No entanto, a primavera de 2011 apresenta um comportamento oposto. O teste de Duncan para os níveis 4 e 5 demonstra um aumento da concentração e um letras que diferem nos níveis 2 e 3, o que significa que os níveis 2 e 3 são iguais, porém o nível 3 também está relacionado ao nível 4 e 5.

A análise das médias do CO com as médias da IICU pelo teste de Duncan parecem ser contraditórias, visto que nas primaveras de 2010 e de 2010+2011 não são observados o aumento da concentração de CO com a intensificação da ICU. No entanto, pelos resultados discutidos previamente, existem uma relação positiva de dependência entre o CO e a IICU, porém com restrições uma vez que a partir de um valor de corte (IICU>6°C) a concentração do CO mostrou-se não ter dependência com a IICU.

O teste de Duncan para NO_x também apresenta certa ambiguidade entre os resultados. Em todas as primaveras de análise as médias de NO_x nos níveis 1, 2 e 3 são similares entre si (letras iguais) e os níveis 4 e 5 com valores de NO_x semelhantes entre eles. No entanto para os níveis 1, 3 e 5 encontra-se a presença de duas letras iguais, indicando que esses níveis também podem estar relacionados com outros níveis. Desta forma, com o teste de Duncan, de um modo geral, é capaz de identificar que a média das concentrações de NO_x se diferem entre si com ao aumento dos níveis de IICU, assinalando, portanto, que o NO_x aumenta com a IICU.

Os resultados do teste de Duncan para o PM₁₀ são os que apresentam evidencias mais claras da relação de interação da ICU e do PM₁₀, uma vez que, em todas as primaveras (2010, 2011 e 2010+2011) é observado

o aumento da média das concentrações para os diferentes níveis de ICU. Nos níveis 1, 2 e 3 há um ligeiro aumento do valor das médias, porém com a presença de letras iguais (indicando um único grupo e assim que não há aumento da concentração com a ICU). Os níveis 4 e 5 também apresentam o aumento das médias (e letras iguais). Desta forma, para o PM10 é identificado claramente 2 padrões distintos onde cada um se difere estatisticamente entre si e apontam que o aumento da concentração do PM10 com a intensificação da ICU, o primeiro padrão (níveis 1, 2 e 3) em que a concentração do PM10 tem um leve aumento e o segundo padrão (níveis 4 e 5) cuja a concentração do PM10 aumenta em relação ao primeiro.

Para o segundo método de abordagem os resultados demonstram que os valores médios das concentrações dos poluentes, em sua maioria, aumentam com a intensidade da ICU, e certos aumentos da concentração desses poluentes são significativos. Os resultados revelam que ICU's mais intensas induzem as maiores concentrações de poluentes. De fato, como a temperatura do ar no centro da área urbana é mais quente, há a formação da circulação da brisa urbana provocada pela ilha de calor, de modo que, a convergência levanta o ar quente da superfície no centro da área urbana e transporta ar frio para a região, causando assim acumulação de poluentes atmosféricos nas áreas urbanas. Dentre os resultados, o aumento da concentração de O₃ com a intensidade da ICU se destacam. Esse resultado discorda com o estudo de Lai e Cheng (2009) que mostraram que o ozônio não aumenta com a ICU na cidade de Taiwan, embora tenham que uma forte ICU pode elevar os níveis de concentração do O₃ no dia seguinte. Na RMSP incomum a outras megacidades, a ICU mais intensas ocorrem durante o período da tarde (14-15HL), quando a luz solar é abundante e assim o NO₂ pode facilmente gerar o O₃.

4.5. Conclusões Parciais

Neste capítulo, com a utilização dos dados observados provenientes das estações meteorológicas e de qualidade do ar na RMSP, foi identificada a

existência das interações da ilha de calor urbana e das concentrações dos poluentes atmosféricos. O período da análise compreendeu os meses da primavera dos anos de 2010 e 2011, por ser a estação do ano com as maiores intensidades da ICU e umas das piores taxas de qualidade do ar na RMSP.

Dois métodos de análise foram utilizados, o primeiro método com a análise da distribuição da concentração dos poluentes para diferentes valores e níveis de intervalos de IICU e o segundo método com a aplicação do teste de comparação de médias.

Os resultados do primeiro método evidenciam uma clara interação da concentração do O_3 e do PM_{10} com a IICU, ambos os poluentes apresentam um padrão de aumento de suas taxas com a intensificação da ICU. Para o CO e NO_x os resultados apresentam dois padrões distintos, primeiramente uma tendência de elevação da concentração nos primeiros níveis da IICU, e a partir de um valor de corte da IICU a concentração do CO e do NO_x parecem diminuir ou mesmo estagnar. A concentração do CO e do NO_x mostram ter uma relação com a intensificação da IICU, no entanto, essa interação parece não ser linearmente positiva quando a ICU se torna mais intensa.

No segundo método de abordagem avaliou-se pelo teste de médias de Duncan, a concentração dos poluentes com os diferentes níveis de IICU. O teste de Duncan permitiu identificar através das médias se as concentrações em cada nível eram iguais ou diferentes entre si. De modo que foi possível verificar se há o aumento da concentração com a intensificação da IICU.

O teste de Duncan para o O_3 e para o PM_{10} apresenta resultados satisfatoriamente coerente com os resultados do primeiro método. Estatisticamente, mesmo que os valores médios das concentrações sejam similares nos primeiros níveis de IICU, é observado um aumento dos valores médios da concentração de O_3 e PM_{10} com a intensificação da IICU. O teste de Duncan para o NO_x e o CO demonstra resultados

imprecisos. Para o CO apenas a primavera de 2011 apresenta resultado estatístico favorável que distingue a interação do aumento da concentração de CO com a intensificação da ICU. Para o NO_x, apesar da imprecisão encontrada nos níveis de IICU com as médias de concentração, é possível observar uma relação positiva do aumento da concentração do NO_x com a IICU.

Desta forma, os resultados de ambas as abordagens evidenciam, em sua maioria, que a concentração dos poluentes aumenta com a intensidade da ICU. As distintas análises revelam que ICU mais intensas induzem as maiores concentrações de poluentes, uma vez que ilha de calor bem configurada induz as circulações de brisa urbana. Essa circulação por ser caracterizada pela convergência do ar quente na área urbana e transporte de ar frio, causa acumulação dos precursores de O₃, bem como outros poluentes do ar, o que agrava a qualidade do ar na região.

5 MODELAGEM NUMÉRICA: PARAMETRIZAÇÃO URBANA E INTERAÇÃO DA ICU E DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

5.1. Introdução

Nesse capítulo apresenta-se uma descrição do modelo meteorológico-químico BRAMS versão 5.0 com as parametrizações de área urbanas implementadas para simular a ilha de calor urbana na RMSP. O BRAMS 5.0 permite uma caracterização da qualidade do ar na região e com isso a identificação das possíveis relações existentes entre a ICU e qualidade do ar. A descrição da configuração das simulações bem como os testes estatísticos aplicados para a validação das simulações está exposta nas

Este capítulo é dividido em duas partes: na primeira parte é realizada a análise das parametrizações da área urbana que foram implementadas no modelo. Assim, comparações das parametrizações e representações do campo de temperatura e vento na RMSP são apresentadas a fim de identificar o esquema urbano que melhor representa a ilha de calor urbana na RMSP. Na segunda parte são apresentados os resultados da análise da interação entre a ilha de calor e o comportamento/distribuição dos poluentes através das simulações numéricas com a química da atmosfera.

5.2. Material

5.2.1. Modelo BRAMS

Neste trabalho propõe-se a aplicação do modelo numérico BRAMS versão 5 (FREITAS et al., 2016 em preparação). O BRAMS é uma nova versão do modelo CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*, FREITAS et al., 2009a; FREITAS et al., 2009b; LONGO et al., 2010), que reúne o acoplamento do sistema de modelagem CCATT-BRAMS com o modelo de solo/superfície JULES (*Joint UK Land Environment Simulator*, MOREIRA et al., 2013), bem como

outras parametrizações e sintonias específicas para regiões tropicais do planeta.

O CCATT-BRAMS é um modelo de transporte químico atmosférico 3D capaz de simular as emissões, transporte, processos de remoção de gases traços e aerossóis e a reatividade química na atmosfera, acoplado de forma on-line ao modelo atmosférico BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*). O CCATT-BRAMS representa o estado da arte em modelagem de tempo químico, pois aborda a solução do transporte, química e aerossóis acoplada à solução do estado atmosférico, o que faz o seu uso ideal neste estudo.

O modelo BRAMS (Freitas et al., 2016) é a versão brasileira do RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003), ajustada para os trópicos e sub-trópicos. O BRAMS é um modelo atmosférico baseado nas equações não hidrostáticas compressíveis (WALKO et al., 2000) que simula circulações que vão desde a micro até a macro escala, sendo frequentemente aplicado à simulações de mesoescala. O modelo em questão tem como base o conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido.

O BRAMS contém diversas opções que possibilitam o uso do modelo em um amplo espectro de aplicações e uma variedade de parametrizações físicas para fenômenos atmosféricos como radiação, convecção, microfísica de nuvens, precipitação, transporte turbulento calor, umidade e momento e interação solo-vegetação-atmosfera, entre outros.

No BRAMS, o módulo químico consiste em um modelo euleriano de transporte e processos de aerossóis e gases traço, sendo baseado na solução da equação da continuidade, na seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{Adv} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{Turb_{CLP}} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{Conv_{prof}} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{Conv_{rasa}} + W + R + Q_{Emiss} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{Reação_{quím}} \quad (5.1)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9)

Onde \bar{s} é a razão de mistura média do traço (ou espécie) no ponto de grade, (1) é o termo de tendência local, (2) é o termo de advecção pelo vento na escala da grade, (3) é o termo de transporte turbulento sub-grade dentro da CLP, (4) e (5) são os termos de convecção profunda e rasa, respectivamente, (6) é o termo de deposição úmida de partículas, (7) é o termo de deposição seca de partículas e aerossóis, (8) é o termo de fonte de emissões, e (9) é o termo de transformações químicas que pode ser tanto sumidouro como fonte da espécie traço.

Na atmosfera, os processos de emissões mais importantes incluem fontes urbano/industriais (transporte, geração de energia, etc...), queimadas (naturais ou antrópicas), processos biogênicos, etc. No modelo BRAMS as emissões de gases traço e aerossóis são introduzidas com o pré-processador de emissões PREP-CHEM-SRC (FREITAS et al., 2011), o qual já está preparado para trabalhar consistentemente com a projeção geográfica do CCATT-BRAMS e suas definições de conjuntos de espécies químicas e reações. A escolha das opções de emissões é realizada pelo usuário, dependendo da necessidade da modelagem.

Para emissões urbanas e industriais, que são as fontes de maior interesse neste estudo, três alternativas de emissões são disponíveis no PREP-CHEM-SRC. Um dos inventários de emissões antropogênicos é o fornecido pelo RETRO (*REanalysis of the TROpospheric chemical composition*). Os dados de emissão tem resolução espacial de 0,5° x 0,5°, resolução temporal mensal e cobertura global, sendo baseados no ano de 2000. O segundo conjunto de dados de emissões antropogênicas é fornecido pelo EDGAR-HTAP (*Emission Database for Global Atmospheric Research*). Este fornece emissões antropogênicas globais dos gases do efeito estufa e poluentes do ar. A resolução espacial é de 0.1° x 0.1° sendo baseados no ano de 2000-2005. O PREP-CHEM-SRC contém ainda um inventário de emissões urbanas para a América do Sul

adequado para aplicações regionais e locais. Esses dados integram informações do inventário de emissões de veículos locais usando dados socioeconômicos, extrapolação de emissões para cidades sem inventários locais e a distribuição geográfica de emissões em diferentes resoluções espaciais (ALONSO et al., 2010, FREITAS et al., 2011). Este inventário da América do Sul é interpolado às grades do modelo usando um esquema de interpolação chamado “delimitado por área”, o que permite uma distribuição mais acurada das emissões urbanas, pois utiliza como dado de entrada, dados de cobertura do solo obtidos por satélite, identificando claramente áreas urbanas.

Na atual versão do BRAMS os processos de interação entre a atmosfera e a superfície são tratados pelo modelo de solo/vegetação denominado de JULES (“*Joint UK Land Environment Simulator*”, ESSERY et al., 2003). No modelo JULES três parametrizações foram implementadas e testadas com a finalidade de melhor caracterizar a representação da área urbana. Nas próximas subseções são realizadas as descrições deste modelo de superfície, assim como a distinção das parametrizações urbanas.

5.2.2. O modelo JULES

O modelo JULES (*Joint UK Land Environment Simulator*) é o novo modelo de superfície usado no sistema *Unified Modelling do UK Met Office* (serviço meteorológico nacional do Reino Unido) e foi desenvolvido a partir do *Meteorological Office Surface Exchange Scheme* (MOSES) (COX et al., 1999; ESSERY et al., 2003) e *Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics* (TRIFFID). O MOSES é responsável pela simulação dos fluxos de energia em superfície e os processos hidrológicos. E o TRIFFID é designado para simular a dinâmica da vegetação e do solo. O JULES é um modelo no estado-da-arte em termos de representação dos processos de superfície, uma vez que apresenta formulações capazes de simular um grande número de processos que ocorrem em superfície.

O JULES requer como dados de entrada informações meteorológicas padrões, através das quais é feito o acoplamento com o modelo atmosférico (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Dados meteorológicos de entrada necessários para o modelo JULES.

Dados	Unidades
Componente descendente da radiação de onda curta na superfície	Wm^{-2}
Componente descendente da radiação de onda longa na superfície	Wm^{-2}
Precipitação	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
Neve	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
Componente zonal do vento (U)	ms^{-1}
Componente meridional do vento (V)	ms^{-1}
Temperatura do ar	K
Umidade específica	$kg\ kg^{-1}$
Pressão atmosférica	Pa

Fonte: Best et al. (2011)

O JULES foi projetado para ter uma estrutura modular aninhado com processos físicos, fornecendo um sistema de modelagem flexível. A estrutura de como os processos são simulados pela versão 3.0 do JULES é ilustrada de forma esquemática na Figura 5.1, onde as conexões entre os módulos mostram o processos físicos que conectam essas áreas. A cor azul representa os processos que estão ligados a hidrologia; a verde refere-se aos processos que envolvem diretamente a vegetação e a roxa é referente aos gases e aerossóis. A camada inferior do diagrama apresenta os processos que ocorrem no solo, as duas camadas acima se referem aos processos localizados entre a superfície e o topo do dossel e as setas na camada superior indicam os fluxos, gases e aerossóis que são trocados com o modelo atmosférico (MOREIRA, 2013). O objetivo dessa estrutura modular é facilitar a substituição dos módulos ou

introduzir novos módulos dentro do sistema de modelagem (Best et al., 2011).

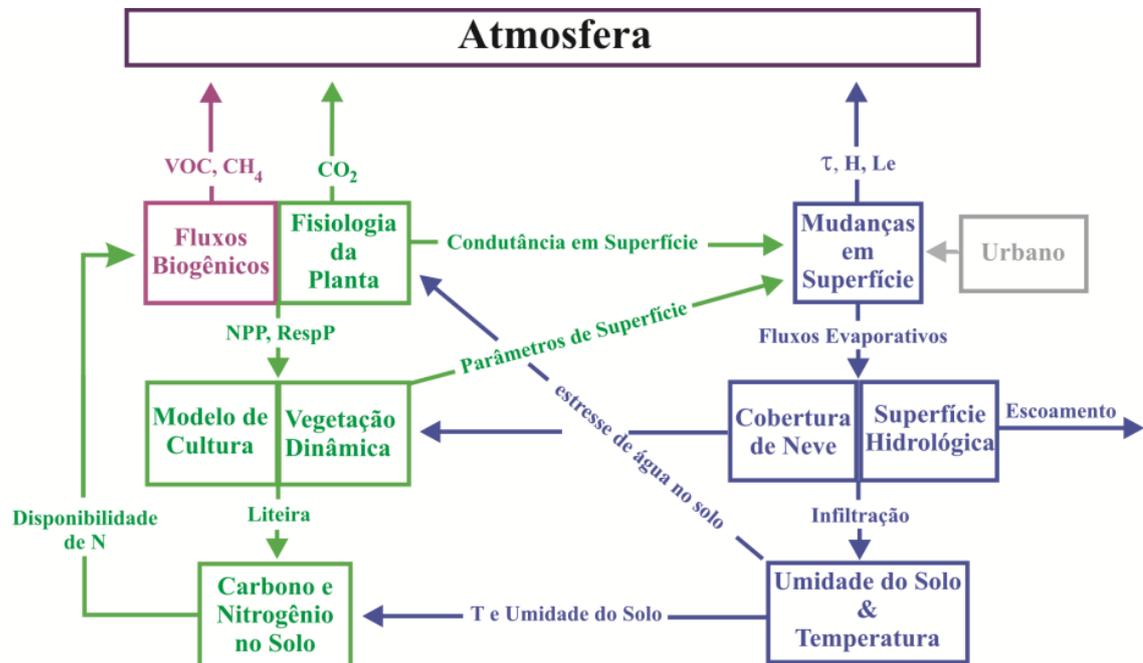


Figura 5.1 – Estrutura do JULES 3.0.
Fonte: Moreira (2013).

A física do JULES pode ser dividida em 5 módulos: balanço de energia, radiação, hidrologia, solo e vegetação. A descrição detalhada de cada módulo está disponível em <https://jules.jchmr.org/model-description> e em (BEST et al., 2011; CLARK et al., 2011):

Para fornecer a máxima flexibilidade em termos de representação da heterogeneidade da superfície, os fluxos de calor, umidade e momento da superfície são tratados pelo JULES através da consideração de dois tipos de superfície: superfícies vegetadas e não vegetadas. A principal diferença entre estes dois tipos de superfície é a maneira em que os parâmetros relacionados à superfície são especificados (por exemplo, albedo, comprimento de rugosidade). Para superfícies não vegetadas esses parâmetros são especificados pelo usuário (com a exceção da opção MORUSES), enquanto que para superfícies vegetadas estes parâmetros são derivados da estrutura da própria vegetação, o que leva a um conjunto alternativo de parâmetros que necessitam ser especificados

(por exemplo, taxa de variação de albedo da superfície com índice de área foliar, taxa de variação de rugosidade comprimento com altura do dossel) (BEST et al., 2011).

Essa heterogeneidade da superfície é modelada no JULES pelo uso da estrutura de “tiles” (ESSERY et al., 2003, BEST et al., 2011). A estrutura de “tiles” significa que os processos de balanço de energia são calculados separadamente para cada tipo de superfície dentro do domínio de um “grid boxes”. As superfícies no JULES são divididas em “grid boxes”, a qual pode ser ocupada por um número de tipos funcionais de plantas (PFT’s) e tipos não funcionais de plantas (NPFT’s). Até cinco PFT’s podem ocupar o grid box, cujos nomes são: Broad leaf trees (BT); Needle leaf trees (NT); C3 grasses (C3G); C4 grasses (C4G) e Shrubs (Sh). Pode também ser ocupado por quatro NPFT’s: Urban, Inland water, Soil e Ice.

Neste trabalho os parâmetros das superfícies vegetadas ou PFT’s não serão analisados, o enfoque principal será a estimativa e uso dos parâmetros das superfícies não vegetadas ou NPFT’s.

5.2.3. O modelo BRAMS 5.0

Como já descrito o JULES é considerado o estado da arte em termos de representação dos processos de superfície. Assim, o modelo integrado BRAMS 5.0 (JULES-CCATT-BRAMS) é capaz de simular os principais processos que ocorrem na superfície e na atmosfera terrestre, além das suas interações. A descrição do acoplamento do JULES ao antigo sistema de modelagem CCATT-BRAMS é apresentada no estudo de Moreira et al. (2013) e Moreira (2013).

O JULES foi acoplado no modelo CCATT-BRAMS de forma on-line usando um esquema explícito. O acoplamento é bidirecional, o que significa que a cada tempo de processamento do modelo o componente atmosférico fornece ao JULES as variáveis meteorológicas usadas como forçantes de entrada. Após esse processamento, o JULES retorna para o modelo um conjunto de variáveis como os fluxos de momento, calor sensível e calor latente, fluxos de radiação de onda longa emergente,

bem como um conjunto de fluxos de gases traços. A Figura 5.2 mostra um ponto de grade do modelo com os principais processos físicos e químicos que são simulados pelo BRAMS versão 5.0.

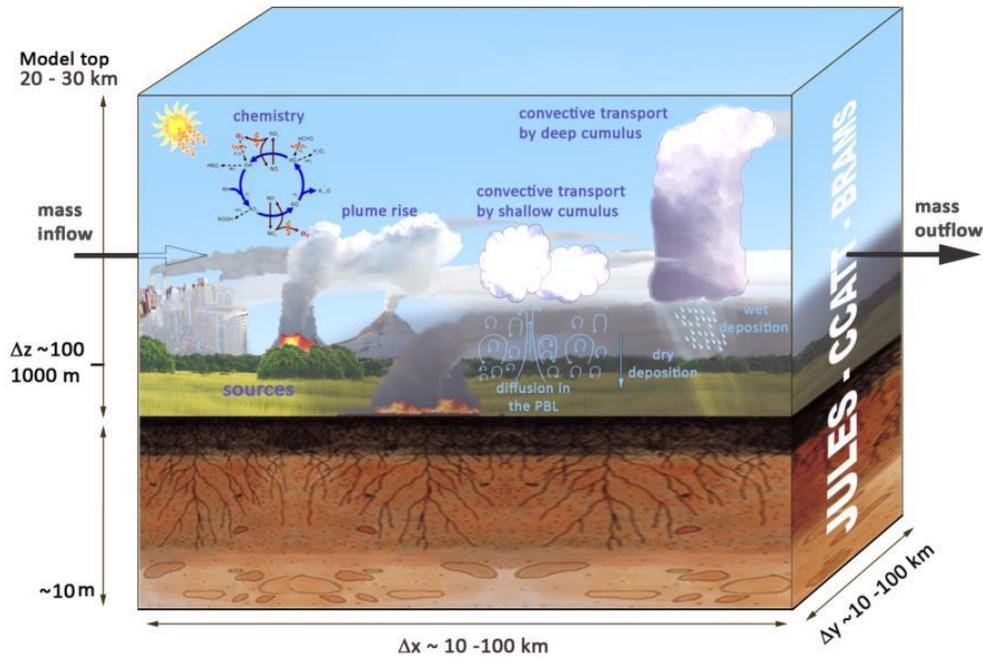


Figura 5.2 – Alguns dos processos sub-grade simulados pelo modelo BRAMS versão 5.
 Fonte: Moreira et al. (2013).

Além dos dados meteorológicos usados como entrada no JULES, que foram mostradas na Tabela 5.1, outras variáveis são requeridas para a inicialização do JULES como: uso do solo, tipo de solo, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), a temperatura da superfície do mar, o carbono do solo, dados de umidade e temperatura do solo.

5.2.4. Parametrizações das áreas urbanas

As estruturas dos ambientes urbanos fazem com que o balanço de energia na superfície seja significativamente diferente das superfícies naturais. A complexa geometria das áreas urbanas faz com que os estudos que caracterizam essas regiões sejam mais difíceis. A configuração tipo prédios e construções comumente usada para caracterizar a área urbana é a representação bidimensional (2D) de uma

série de cânions de ruas e telhados, que foram adotados primeiramente por Nunez; Oke (1977) e amplamente usada na comunidade científica (MASSON, 2000; MARTILLI et al., 2002; HARMAN; BELCHER, 2006). Contudo, uma representação fiel dos fluxos de energia da superfície que fornecem a forçante para a atmosfera também é de suma importância. A introdução nos modelos numéricos da representação da superfície por tiles ou mosaicos de superfícies para representar a heterogeneidade da escala sub-grade, tornou possível modelar a fração da grade que contém a superfície urbana.

Diante da necessidade de representar a área urbana com maiores detalhes, dois esquemas urbanos foram implementadas no JULES (Tabela 5.2). O primeiro é uma única camada (ou superfície), enquanto o segundo consiste de duas superfícies, uma rua e um telhado.

Tabela 5.2 - Opções físicas de parametrização urbana no JULES

Física	Opções
Modelo urbano	Esquema de uma camada: 1 <i>Tile</i> (1T) Esquema de duas camadas: 2 <i>Tile</i> (2T) MORUSES

Fonte: adaptado de Best et al. (2011)

O uso da estrutura de “tiles” no JULES significa que o balanço de energia na superfície é calculado separadamente para cada tiles, ou seja, são calculados para as 9 superfícies (5 vegetadas e 4 superfícies não-vegetadas incluindo superfície urbana) e os resultados se combinam para dar uma média na *grid box*. Portanto, tanto o esquema de uma camada como de duas camadas, assumem que as camadas da superfície estão num constante estado de troca com a superfície em todos os pontos dentro do *grid box* contendo qualquer tipo de superfície específica. Como consequência, cada *tile* produz seu próprio fluxo de superfície, seu próprio gradiente vertical das variáveis atmosféricas prognósticas (vento,

temperatura e umidade) entre a superfície e um nível atmosférico chamado "a altura de mistura". Acima da altura de mistura, estes gradientes verticais juntam-se e o fluxo médio na *grid box* fornece a condição de contorno para o primeiro nível do modelo atmosférico.

Em síntese, o perfil da temperatura acima da camada de mistura é o mesmo para todas as superfícies. Abaixo desta altura, cada superfície (ou *tile*) tem o seu próprio perfil de temperatura e fluxo de calor associado da superfície. A média ponderada dos perfis de temperatura e de fluxos são então usadas para se obter o valor do *grid box*. A Figura 5.3 ilustra em princípios gerais os esquemas de uma e duas camadas.

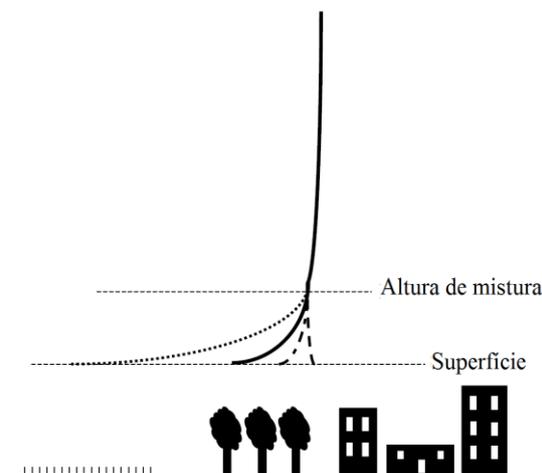


Figura 5.3 – Representação dos fluxos em cada tiles. A linha tracejada: perfil urbano; linha de ponto e traço: perfil de árvore; linha pontilhada: perfil grama; e linha sólida: perfil médio do grid box.

Fonte: Adaptado de Best (2005).

5.2.4.1. Esquema de uma camada

No esquema de uma camada ou 1 *Tile* (1T), uma simples representação de solo nu (ou volume nu) da superfície urbana é adotada através da introdução de uma capacidade térmica suficientemente grande, juntamente com um acoplamento radiativo entre a superfície e o solo subjacente. Best (2005) mostrou que uma representação tão simples pode levar a melhorias significativas nos modelos de previsão numérica de tempo, além da vantagem da fácil implementação.

Esse esquema usa a equação de Penman-Monteith para resolver o balanço de energia da superfície pelos fluxos turbulentos de calor e umidade para a atmosfera. Os fluxos turbulentos são calculados usando a aproximação de resistência:

$$H = \rho c_p C_H U \Delta\theta = \frac{\rho \lambda \Delta\theta}{r_A} \quad (5.1)$$

$$\lambda E = \rho \lambda C_E U \Delta q = \frac{\rho \lambda \Delta q_s}{r_A + r_s} \quad (5.2)$$

Onde H é o fluxo turbulento de calor sensível, E é o fluxo turbulento de umidade, c_p é a umidade específica, λ é o calor latente de vaporização da água, C_H e C_E são os coeficientes de transferência de calor e umidade, respectivamente, U é a velocidade do ar no primeiro nível do modelo atmosférico, $\Delta\theta$ é a diferença de temperatura potencial entre a superfície e o primeiro nível do modelo, Δq_s é a diferença entre a umidade específica saturada na superfície e a umidade específica no primeiro nível do modelo, r_A é a resistência aerodinâmica e r_s é a resistência da superfície (ou resistência superficial). A resistência aerodinâmica é calculada usando a teoria de similaridade de Monin–Obukhov com funções de estabilidade para condições instáveis e estáveis.

Para superfícies não vegetadas, a resistência da superfície depende apenas da umidade disponível na primeira camada do solo. Isto significa que, ao contrário da vegetação, estas superfícies ainda podem evaporar durante a noite, uma vez que não há uma dependência direta da radiação solar. Todas as superfícies (tanto vegetadas quanto não vegetadas) são livres para evaporar a água disponível na superfície; isto implica que, para cada tipo de superfície, é assumido que a fração c/c_m evapora com resistência superficial zero, onde c é a massa de água da superfície e c_m é a massa de água da superfície máxima para o tipo de superfície.

Os fluxos de superfície da área urbana são calculados usando a equação do balanço de energia da superfície, portanto, os fluxos turbulentos de calor e umidade e o fluxo de calor do solo são considerados (Figura 5.4).

Isto significa que a superfície urbana é parametrizada da mesma maneira que uma superfície de solo nu, exceto que os parâmetros de superfície (albedo da superfície, massa máxima de água de superfície, resistência superficial, infiltração de água de superfície e comprimento de rugosidade) são ajustados para ser apropriado para uma superfície urbana.

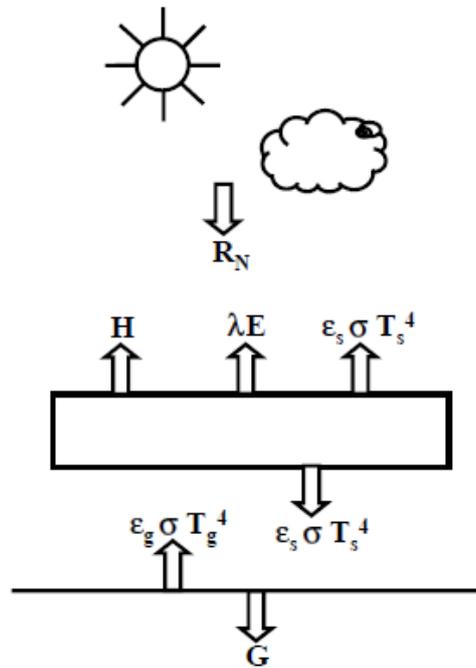


Figura 5.4 - Balanço de energia na superfície para o esquema de 1T.
Fonte: Adaptado de Best (2005).

De modo que se tem:

$$C \frac{\partial T_s}{\partial t} = R_N - H - \lambda E - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (5.3)$$

e

$$G = \sigma T_s^4 + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (5.4)$$

onde T_s é a temperatura da superfície, T_g é a temperatura da superfície do solo subjacente, ε_s e ε_g são os valores de emissividade da superfície e do solo subjacente, respectivamente, R_N é a radiação líquida, G é o fluxo de calor da superfície do solo e C representa a capacidade efetiva de calor por unidade de área na superfície.

5.2.4.2. Esquema de duas camadas

No esquema de duas camadas, a geometria da área urbana é considerada através da representação de duas superfícies, uma simulando o telhado dos edifícios e a outra o cânion. Estudos como Best et al. (2006) mostraram que a representação de 2 faces de superfície resulta numa melhora eficaz nos resultados em relação ao esquema de 1 *tile*. Além disso, Harman; Belcher (2006) e Porson et al. (2009) demonstraram que a representação de duas faces (telhado e cânion) fornece um boa aproximação em relação a esquemas mais complexos como os que representam cada uma das faces da superfície urbana (4 faces - telhado, duas paredes e rua).

A física da parametrização do modelo de duas camadas baseia-se na simplificação de um modelo de quatro faces (HARMAN et al., 2004a,b; HARMAN; BELCHER, 2006). Em particular, a troca radiativa dentro do cânion é formulada com um albedo efetivo e uma emissividade efetiva (HARMAN et al., 2004a). A transferência de calor baseia-se na formulação do comprimento de rugosidade do momento e do calor (HARMAN et al., 2004b). O armazenamento de calor dentro do dossel urbano (edifícios) e a transferência de calor para solos profundos são parametrizados a fim de representar a elevada capacidade térmica da superfície urbana. Todos estes processos são dependentes da morfologia da cidade estudada.

Assim como no esquema de uma superfície, no esquema de duas camadas o balanço de energia na superfície também é calculado separadamente para os 9 tipos de superfície e os resultados é a combinação que fornecem uma média na *grid box*. Desta forma, o balanço de energia da superfície é dado por:

$$C \frac{dT_*}{dt} = R_N - Q_H - Q_E - G \quad (5.5)$$

Onde T_* é a temperatura na superfície (ou dossel urbano), C é a capacidade térmica da área ($J K^{-1}m^{-2}$), R_N é saldo de radiação líquida

(Wm^{-2}), Q_H é o fluxo de calor sensível (Wm^{-2}), Q_E o fluxo de calor latente (Wm^{-2}) e G do fluxo de calor do solo (Wm^{-2}) (COX et al., 1999; ESSERY et al., 2003). Nota-se que o termo $C dT_*/dt$ permanece na equação se a superfície tem uma determinada espessura, formando assim um dossel. Além disso, observa-se que não há nenhum fluxo de calor antropogênico na equação (5.5). O fluxo de radiação líquida R_N é tomado como sendo a soma da radiação solar R_S e a radiação de onda longa R_L . O fluxo de calor sensível Q_H e fluxo de calor latente Q_E são formulados como:

$$Q_H = \rho c_p f_H C_H U(1) \Delta T \quad (5.6)$$

$$Q_E = \psi \rho c_p f_H C_H U(1) \Delta q \quad (5.7)$$

Onde ψ é um fator dependente da resistência aerodinâmica, do solo e da resistência da vegetação para evaporação (ESSERY et al., 2003), ΔT e Δq respectivamente é a diferença de temperatura e umidade entre a superfície e o primeiro nível do modelo atmosférico, C_H é o coeficiente de transferência de calor, f_H é função de estabilidade e $U(1)$ é a velocidade do vento no primeiro nível do modelo. O fluxo de calor do solo G é normalmente expresso como uma combinação linear da troca radiativa e da condução de calor, dependendo de uma fração radiativa f_{rad} :

$$G = f_{rad}(\sigma T_*^4 - \sigma T_{soil}^4) + (1 - f_{rad}) \frac{2\lambda}{\Delta z} (T_* - T_{soil}) \quad (5.8)$$

Com f_{rad} dependente do tipo de cobertura do solo, T_{soil} é a temperatura da superfície da camada de solo, λ a condutividade térmica e Δz é a espessura da camada superior do solo. A combinação do fluxo de calor do solo G para todos os *tiles*, como uma função do tipo de cobertura fraccionada, representa a condição de limite superior para equação de difusão de temperatura do solo:

$$G_{soil} = \lambda_{soil} \frac{\partial T_{soil}}{\partial z} \quad (5.9)$$

Onde λ_{soil} é a condutividade térmica do solo. A Figura 5.5 ilustra como o esquema de uma camada e o esquema de duas camadas são acoplados a atmosfera e a camada do solo subjacente.

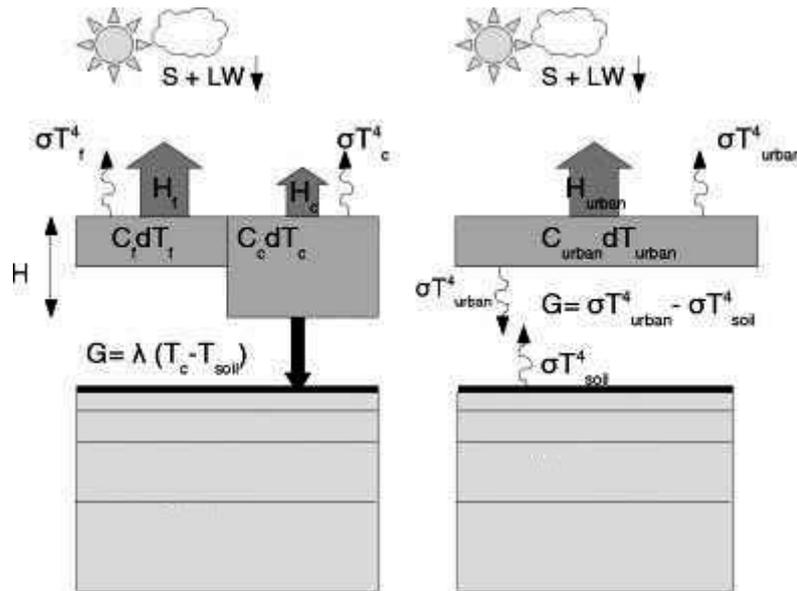


Figura 5.5 - Ilustração do esquema de duas camadas (esquerda) e do esquema de uma camada (direita).
Fonte: Adaptado de Porson et al. (2010).

No esquema urbano de duas camadas um fraco acoplamento radiativo entre o dossel urbano e o solo subjacente é implementado, de modo que, se assume uma fração radiativa f_{rad} igual 1 (Best, 2005), então:

$$G = (\sigma T_{urban}^4 - \sigma T_{soil}^4) \quad (5.10)$$

Com $T_{urban} = T_*$, a temperatura do dossel urbana. Para as propriedades volumétricas do material, o dossel urbano é considerado como uma espessura efetiva comparado com a escala de profundidade usando uma alta magnitude da capacidade de calor da área. A combinação do fraco acoplamento entre o solo subjacente e a capacidade de calor da área, portanto, uma “espessura do dossel urbano” permite que a superfície

urbana armazene uma grande fração da energia fornecida pela radiação líquida dentro do substrato urbano. Como resultado, o dossel urbano é caracterizado por uma grande inércia térmica.

Neste esquema, a capacidade do dossel urbano em reter a água é mínima ($0,5 \text{ kgm}^{-2}$), assim o processo de drenagem da água é favorecido sobre a infiltração de superfície. O dossel urbano é, portanto, frequentemente equivalente a um bloco de uma camada seca com uma alta capacidade de calor. Assim, o excesso de água na área urbana escorre para esgotos e sistemas de drenagens, em vez de se infiltrar no solo onde estaria disponível para ser evaporado, retornando para a atmosfera.

O esquema de duas camadas segue a geometria simplificada 2D seguida por Oke (1987) e outros, tais como Masson (2000) e Martilli et al. (2002). Um esquema desta geometria simplificada 2D é ilustrado na Figura 5.6. Neste esquema nenhuma orientação de rua específica é escolhida, é considerada uma média sobre as orientações dos cânions. Então, se W representa a largura da rua, R a combinação do comprimento entre a rua e o telhado, e H é a altura do edifício, é possível expressar o índice planar (λ_{plan}) e o índice frontal (λ_{front}) como uma função da relação H/W e W/R como:

$$\lambda_{plan} = 1 - \frac{W}{R} \quad (5.11)$$

$$\lambda_{front} = \frac{2}{\pi} \frac{H}{W} \frac{W}{R} \quad (5.12)$$

Onde $2/\pi$ é originado da média das orientações. Esta geometria é representada por duas faces, uma rua e um telhado. Em comparação com o esquema de uma camada, a abordagem de 2 camadas é justificada pelas grandes diferenças nos fluxos de balanço de energia entre o cânion e telhado (HARMAN; BELCHER, 2006). Devido essas diferenças no balanço de energia, a rua e o telhado devem ser modelados como *tiles* separados. Os *tiles* do cânion e do telhado têm equações do balanço de

energia separadas dependendo das suas próprias características e parâmetros. No total, quatro processos parametrizados caracterizam o esquema de duas camadas:

- 1- A troca da radiação de onda curta dentro do cânion (cálculo da radiação solar líquida para o *tile* cânion R_S);
- 2- A troca de radiação de onda longa dentro do cânion (cálculo do saldo da radiação de onda longa para o *tile* cânion R_L);
- 3- A transferência de fluxo de calor sensível através de uma rede de resistência para o cálculo do fluxo de calor sensível Q_H ;
- 4- A inércia térmica e o acoplamento com o solo subjacente para os termos residuais de armazenamento $C dT_*/dt$ e fluxo de calor do solo G .

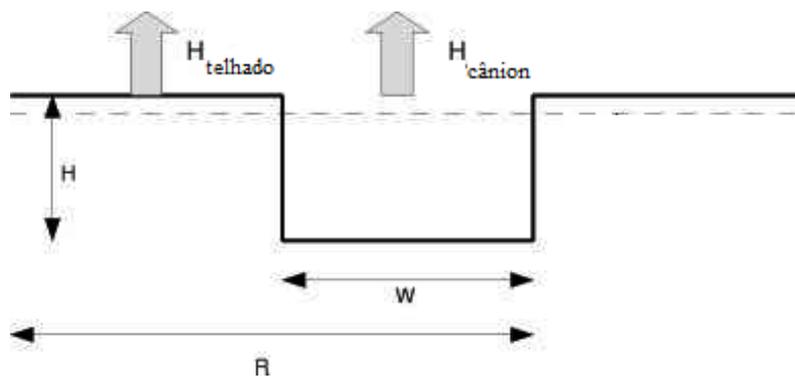


Figura 5.6 - Geometria 2D simplificada do dossel urbano.
Fonte: Adaptado de Porson et al. (2010).

A parametrização do esquema de duas camadas no JULES pode ser usada por dois métodos: o esquema 2T e o MORUSES. No esquema 2T, a diferença da superfície urbana é dada através das especificações dos parâmetros de superfície. No MORUSES os parâmetros da superfície são determinados a partir da morfologia e das propriedades do material da área urbana, que leva em consideração os valores que são medidos da geometria urbana, como albedo, o comprimento de rugosidade do calor e a capacidade térmica ou inércia térmica, permitindo a distribuição dos fluxos da superfície com diferentes propriedades estruturais. A troca radiativa dentro do cânion é formulada com um albedo efetivo e uma emissividade efetiva, baseada nas trocas entre as várias faces (lados) dos

cânions. O comprimento de rugosidade do momento da área urbana é determinado a partir da formulação de Macdonald et al. (1998), para uma matriz alternada de cubos; o cânion e o telhado têm a mesma rugosidade (PORSON et al., 2010a, b)

O comprimento de rugosidade da temperatura é proveniente de uma parametrização física que relaciona a morfologia urbana e utiliza uma rede de resistências para representar a transferência de calor (Figura 5.7). A superfície do cânion inclui os efeitos da recirculação de jatos por meio do uso de duas vias de resistência; um para cada região de recirculação e de ventilação. Para ambos os elementos, três resistências são usadas, duas representando o calor através de uma camada de limite interna adjacente de cada face e uma representando a transferência de calor através da subcamada de inércia. O telhado, que é mais simples, tem apenas duas resistências que representam a camada limite interna e camada de subcamada de inércia (HARMAN et al., 2004;. PORSON et al., 2010a).

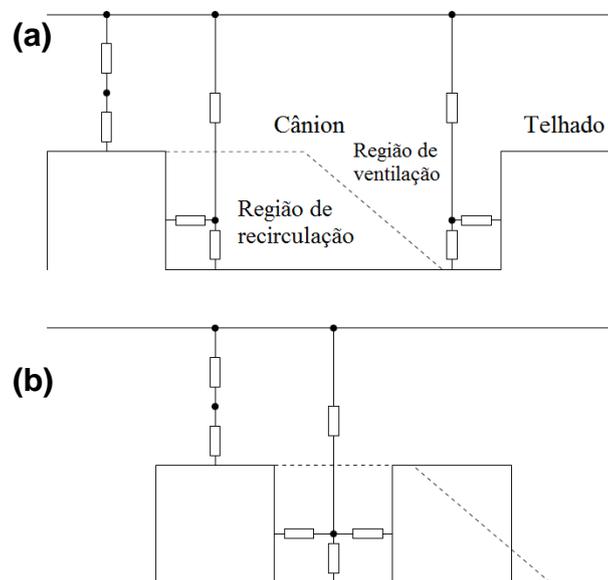


Figura 5.7 - A geometria bidimensional do cânion usado no MORUSES, ilustrando a rede de resistência utilizada na parametrização do comprimento de rugosidade para o calor. Os painéis ilustram: (a) uma ampla geometria de cânion com ambas as regiões de ventilação e de recirculação; e (b) um cânion estreito, com apenas uma região de recirculação. Fonte: adaptado de Harman et al. (2004).

A capacidade de calor efetiva da área é determinada para representar o telhado e o cânion, que inclui as contribuições de ambas as paredes e a rua. Estas são determinadas considerando a resposta diurna usando o modelo de força de restauração, enquanto um parâmetro ajustável do telhado também é introduzido para aumentar a flexibilidade necessária para capturar diferentes oscilações. A superfície do cânion é condutivamente acoplada através da rua para a superfície subjacente do solo, enquanto as paredes do cânion e o telhado são desacoplados do solo pela imposição de uma condição de contorno de fluxo zero.

A diferença entre o esquema 2T e o MORUSES basicamente está associada à caracterização dos parâmetros urbanos, o 2T determina os parâmetros urbanos a partir de algumas valores fornecidos pelo usuário como, comprimento de rugosidade, enquanto no MORUSES, os parâmetros são estimados por formulações da geometria urbana. Os dados usados pelos MORUSES podem ser obtidos de uma variedade de lugares, dependendo da disponibilidade. No entanto, a quantidade e qualidade dos dados conhecidos pelo usuário decidirá a escolha do modelo urbano utilizado.

5.3. Métodos

5.3.1. Configuração das simulações

Nesta seção são descritas principais características que foram utilizadas na modelagem como dados de topografia, dados de emissão, condições iniciais/contorno, dados de uso do solo, resolução horizontal e outras configurações usadas.

Arquivos de topografia

Nas simulações foram utilizados os dados de topografia disponíveis através do centro de dados *United States Geological Survey's* (USGS) do *Earth Resources Observation Systems* (EROS), com resolução latitude-longitude de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km) (GESCH et al., 1999).

Condição inicial e de contorno

Como condição inicial e de contorno foram utilizadas as reanálises do ERA-INTERM com espaçamento horizontal $0,75^\circ$, aproximadamente 80 km x 80 km em intervalos de 6 horas provenientes do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

Resolução horizontal

Como o enfoque deste estudo é a escala local foram necessárias realizar simulações com domínios de maior abrangência até chegar ao domínio de interesse. Para tal, primeiramente, foi realizada uma simulação em uma grade de 30 km de resolução horizontal (Figura 5.8 a), com número de pontos de x e y de 240 e 260 respectivamente, centrada em 55°W e 20°S , a qual cobre toda a América do Sul. Em seguida outra simulação foi feita com uma grade de 10 km de resolução horizontal (Figura 5.8b), centrada em $46,6^\circ\text{W}$ e $23,6^\circ\text{S}$ com número de pontos de x e y de 170 e 111 respectivamente, abrangendo uma parte da região Sul e Sudeste do Brasil. O objetivo dessas simulações foi apenas de possibilitar reduções de escala (do inglês, *downscaling*), passando de ~ 80 km (reanálises do ERA-INTERIM) para 30 km, posteriormente de 30 km para 10 km. De posse do resultado da simulação do domínio de 10 km foram gerados os novos dados para alimentarem o domínio de escala local da RMSP. Esse domínio tem resolução horizontal de 1 km (Figura 5.8c), número de pontos de x e y de 120 e 120, centrados na área central da RMSP em -46.6°W e -23.7°S .

Na vertical, em todas as simulações foram utilizados 41 níveis em coordenadas sigma-z, com um espaçamento inicial de 20 m próximo à superfície e uma amplificação por um fator de 1,1 até a altura de 1000 m (grade telescópica) para permitir um melhor detalhamento da Camada Limite. Acima de 1000 m, o espaçamento permaneceu constante e igual a 1000 m. As características dos domínios horizontais e das principais configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações são mostrados, respectivamente, nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3- Configuração horizontal dos domínios utilizados.

Domínio	Δx e Δy (km)	Δt (s)	Pontos em x e y	Centro do Domínio (°) (Latitude/Longitude)
1	30	25	240 e 260	-20,0°/-55,0°
2	10	25	170 e 111	-23,6°/-46,6°
3	1	8	120 e 120	-23,7°/-46,6°

Tabela 5.4 – Configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações.

Número de pontos na região de Fronteira lateral utilizados para <i>nudging</i>	25
Escala de tempo de <i>nudging</i> nas fronteiras laterais	900 s
Parametrização de radiação de onda curta/longa	RRTMG
Frequência de atualização na tendência da radiação	1200 s
Parametrização de Cúmulos	Esquema Grell-Freitas (2015) Ativada nos domínios 1 e 2
Parametrização de Cúmulos Rasos	Grell-Freitas (2015) Ativada nos domínios 1 e 2
Microfísica	Greg Thompson cloud water single moment Nível de complexidade 3
Inicialização de umidade do solo	Inicialização heterogênea
Parametrização Turbulenta	Deformação Horizontal Esquema de Mellor e Yamada (1974, 1982)

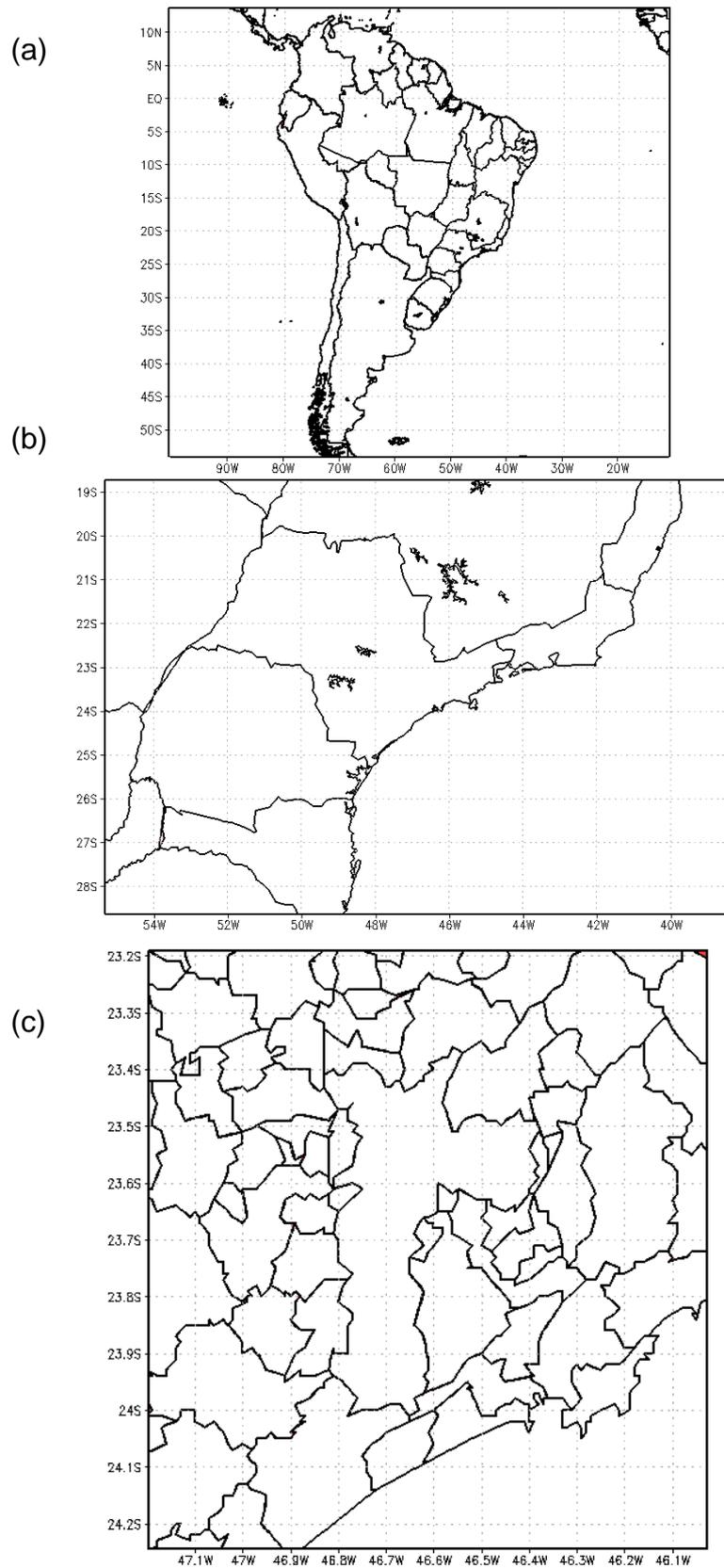


Figura 5.8 – Domínios das simulações realizadas (a) América do Sul com resolução de 30 km, (b) Região Sudeste com resolução de 10 km e (c) RMSP com resolução de 1 km.

Arquivos de uso do solo

O arquivo de vegetação utilizado possui resolução espacial de 1 km (OLSON, 1994). A distribuição do uso do solo na RMSP é mostrado na Figura 5.9.

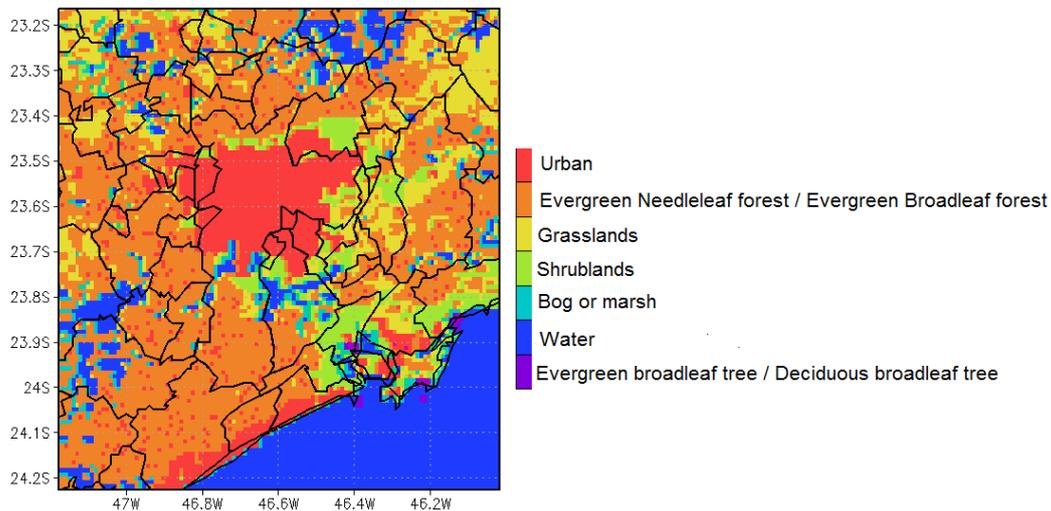


Figura 5.9 – Mapa de uso do solo da RMSP sob o domínio de 1km.

O modelo JULES é configurado para ser executado com números distintos de superfícies, de 9 “*NPATCH*”, os quais para cada *grid box* é obtida a fração dos 9 tipos de cobertura de solo utilizada pelo JULES (*Broad leaf trees*, *Needle leaf trees*, *C3 grasses*, *C4 grasses*, *Shrubs*, *Urban*, *Inland water*, *Soil e Ice*).

Assim, em um *grid box* pode-se ter até 9 tipos distintos de cobertura de uso do solo, de tal forma que será tratado pelo JULES separadamente e retornado para o modelo BRAMS a média ponderada dos fluxos obtidos por cada um. Nos estudos anteriores com o modelo acoplado JULES-CCATT-BRAMS, somente era possível executar o JULES com “*NPATCH*” menor ou igual a 9, onde somente era verificado a fração “*urban*”. Para esse caso, em que apenas 9 “*NPATCH*” é usado, a representação de área urbana utilizada é o esquema 1T.

No presente estudo, incluiu-se um novo tipo de cobertura do solo utilizada pelo JULES, a fração correspondente *urban_roof*, de modo que foi possível usar 10 “*NPATCH*”. Com a inclusão de mais um tipo de cobertura

do solo, a *urban_roof*, são acionadas as parametrizações do esquema de duas camadas (2T ou MORUSES). A *urban_roof* não representa legitimamente uma fração de cobertura do solo, ela é apenas usada para indicar que serão ativadas o tratamento de área urbana pelo esquema de duas camadas (esquema 2T ou MORUSES). O valor da fração de telhado (*urban_roof*) é calculado internamente pelo JULES a partir a fração *urban*. Assim com a implementação da parametrização urbana do esquema de duas camadas, a fração dos 10 tipos de cobertura de solo utilizada pelo JULES são as seguintes: *Broad leaf trees*, *Needle leaf trees*, *C3 grasses*, *C4 grasses*, *Shrubs*, *Urban*, *Inland water*, *Soil*, *Ice* e *urban_roof*.

Arquivo de emissões

As emissões usadas foram: biogênicas, queima de biomassa e a urbano-industrial. Para emissões biogênicas foram usadas os dados do MEGAN, para a emissões de queima de biomassa foram estimadas usando pixels de incêndio detectados pelo GOES, MODIS e produtos do INPE. Para emissões urbanas, são usados os dados do RETRO, EDGAR-HTAP e dados do inventário de emissão urbana da América do Sul (ALONSO et al., 2010).

Parâmetros urbanos

Os parâmetros urbanos usados nas simulações para caracterizar a RMSP foram baseados em estudos de área urbana como, albedo e emissividade das superfícies urbanas, altura dos prédios, espessura de ruas/estradas. A Tabela 5.5 mostra os valores dos parâmetros urbanos adotados na simulação. A consideração dos respectivos parâmetros urbanos foi baseada em estudos específicos tanto para áreas urbanas gerais (OKE, 1987) como para a RMSP (MORAIS et al., 2009; MARCIOTTO et al., 2010, FERREIRA et al., 2012)

Tabela 5.5 – Parâmetros usados na área urbana

Parâmetros		Valores
Albedo	Ruas	0,05
	Paredes	0,10
	Telhados	0,10
	Área urbana (média)	0,12
Emissividade	Ruas	0,95
	Paredes	0,71
	Telhados	0,90
	Área urbana (média)	0,96
Altura das construções		10 metros
Tamanho de ruas		10 metros

Período de estudo

Como já descrito no Capítulo 4, adotou-se a primavera de 2010 e 2011 como período de análise. Sendo, o mês de setembro com os maiores valores de IICU e as maiores concentrações de poluentes. Por isso, a partir dos critérios de filtragem que foram apresentados no capítulo 4 (predomínio de sistema de alta pressão, ausência de nebulosidade e dias da semana), o período de estudo compreende os dias 26 a 30 de setembro de 2011. No entanto, esse período foi dividido em dois casos de estudo, o primeiro correspondente aos dias 26 e 27 de setembro, dias que ocorreram registros de temperaturas amenas, ocorrência de névoa úmida, com a presença de algumas nuvens médias e altas e uma ilha de calor mais baixa de cerca de 2,6°C em média, enquanto no segundo caso de estudo, dias 29 e 30 de setembro, foram registradas temperaturas significativamente elevadas na RMSP, ocorrência de céu claro sem nuvens significativas e uma ilha de calor mais intensa de 3,5°C em média. Dessa forma, é possível caracterizar dois casos distintos de IICU e os impactos na concentração dos poluentes atmosféricos.

Um ponto importante sobre a modelagem do período de estudo é a técnica de “*spin-up*” (técnica que consiste em executar o modelo por um

intervalo de tempo até que as mudanças em seus campos fiquem menor até um ponto que o modelo está em equilíbrio (YANG et al., 1995) Mesmo sendo um procedimento muito caro computacionalmente, foi aplicado um “*spin-up*” de 30 dias. Destaca-se nesta técnica que o primeiro dia é descartado por representar o período em que o modelo poderia estar não ajustado dinamicamente.

Comparação das simulações e observações

Nos estudos com modelos atmosféricos verificam-se incertezas, que podem ser decorrentes da representação dos processos físicos no modelo ou mesmo da precisão utilizada nos cálculos. Da mesma forma, dados observados também apresentam incertezas derivadas de fatores como, por exemplo, medições e leituras de dados realizados de erroneamente pelo observador, a falta de manutenção preventiva nas estações e até em certas situações, a transferência e o armazenamento dos dados podem ocasionar incertezas nas observações.

Portanto, para avaliar os dados provenientes do modelo BRAMS e das observações, alguns testes estatísticos foram realizados a fim de verificar a qualidade dos comportamentos físicos previstos pelo modelo e verificar a concordância com os dados da observação.

Adicionalmente, vale destacar que a comparação dos dados observados com os dados simulados também apresentam incertezas, uma vez que, para representar o valor pontual da estação no modelo é considerado o pontos de grade mais próximo a estação, o que também acarreta em incertezas.

Os testes estatísticos usados para a comparação entre os dados observados e modelados são descritos a seguir.

Coefficiente de Correlação: este índice estatístico permite avaliar o grau de correlação entre os valores simulados pelo modelo (“P”) e os valores observados (“O”), além de verificar se essa correlação é positiva ou negativa. Portanto, o coeficiente de correlação mostra a associação linear entre duas variáveis. Altas correlações indicam um bom acordo

entre as fases das oscilações, ou seja, as variações ocorrem num mesmo sentido simultaneamente.

Apesar das correlações fornecerem uma boa informação sobre a relação linear entre as simulações e as observações, a desvantagem do uso deste teste é que ele não considera os desvios que podem estar presentes na previsão, além de não ser capaz de identificar a acurácia das simulações.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sqrt{\text{var}(P) \cdot \text{var}(O)}} = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sigma_P \cdot \sigma_O} \quad (5.13)$$

Sendo,

$\bar{P} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i$ é a média aritmética dos valores simulados pelo modelo;

$\bar{O} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n O_i$ é a média aritmética dos valores observados;

σ_P e σ_O são os desvios padrões de valores previstos e valores observados, respectivamente.

Este teste estatístico assume valores entre -1 e 1, sendo:

- R = 1 Significa uma correlação perfeita positiva entre a observação e o simulado.
- R = - 1 Significa uma correlação negativa perfeita entre a observação e o simulado. Isto é, as variações ocorrem no sentido oposto. Se uma aumenta, a outra sempre diminui.
- R = 0 Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear. Assim, o resultado deve ser investigado por outros testes estatísticos.

Viés ou erro médio: é a diferença entre a média das simulações e a média das observações. Representa a média dos desvios (“*bias*”) da simulação, fornecendo informações sobre o desempenho de toda a série

de simulações e não informações sobre erros individuais. Este teste estatístico indica se o modelo está subestimando ou superestimando as observações e não representa uma medida de acurácia.

Valores positivos ($ME > 0$) indicam que as simulações estão superestimando as observações e valores negativos ($ME < 0$) indicam que as simulações em média estão subestimando as observações.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) = \bar{P} - \bar{O} \quad (5.14)$$

Erro Quadrático Médio: este teste estatístico é usado para medir a acurácia das simulações, informando a maneira com que o valor estimado pelo modelo se aproxima do valor observado. Assim, neste índice é verificado o grau de espalhamento obtido na correlação entre os valores simulados e observados.

Altos valores de MSE indicam um alto nível de discrepância entre a simulação e a observação e valores baixos indicam pouca discrepância entre a simulação e a observação. Neste trabalho será utilizada a raiz quadrada do MSE (RMSE), que é considerada como a magnitude típica dos erros das simulações e tem as mesmas dimensões dos valores simulados pelo modelo (“P”) e dos valores observados (“O”).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (5.15)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (5.16)$$

5.4. Resultados

5.4.1. Parametrização de área urbana no JULES

5.4.1.1. Avaliação estatística

Os testes estatísticos apresentados foram aplicados as séries temporais da variável temperatura do ar a 2 metros com a finalidade de avaliar objetivamente o desempenho do modelo BRAMS versão 5 para as três diferentes parametrizações de área urbana, esquema 1T, 2T e MORURES. A Tabela 5.6 mostra os resultados da análise estatística, assim como a Figura 5.10.

Tabela 5.6 - Testes estatísticos aplicados aos resultados da simulação numérica em cada ponto de estação meteorológica.

Estações	VIES			RMSE			CORR		
	1T	2T	MOR	1T	2T	MOR	1T	2T	MOR
Água Funda	1,54	0,76	2,19	4,27	4,48	4,27	0,79	0,79	0,76
Congonhas	0,62	-0,24	1,18	4,29	4,75	4,21	0,73	0,73	0,70
Guarulhos	0,80	-0,11	1,23	3,75	3,98	3,79	0,83	0,84	0,80
Mirante	0,62	-0,39	1,34	4,11	4,46	4,07	0,78	0,80	0,75
Parelheiros	-2,66	-2,65	-2,52	5,02	5,04	4,90	0,70	0,70	0,70
Pinheiros	0,34	-0,60	1,07	3,80	4,35	3,65	0,83	0,83	0,80
São Caetano	-0,57	-1,39	0,01	3,76	4,31	3,71	0,79	0,79	0,76
Taboão Serra	-0,92	-1,55	-0,47	3,90	4,41	3,72	0,79	0,79	0,76

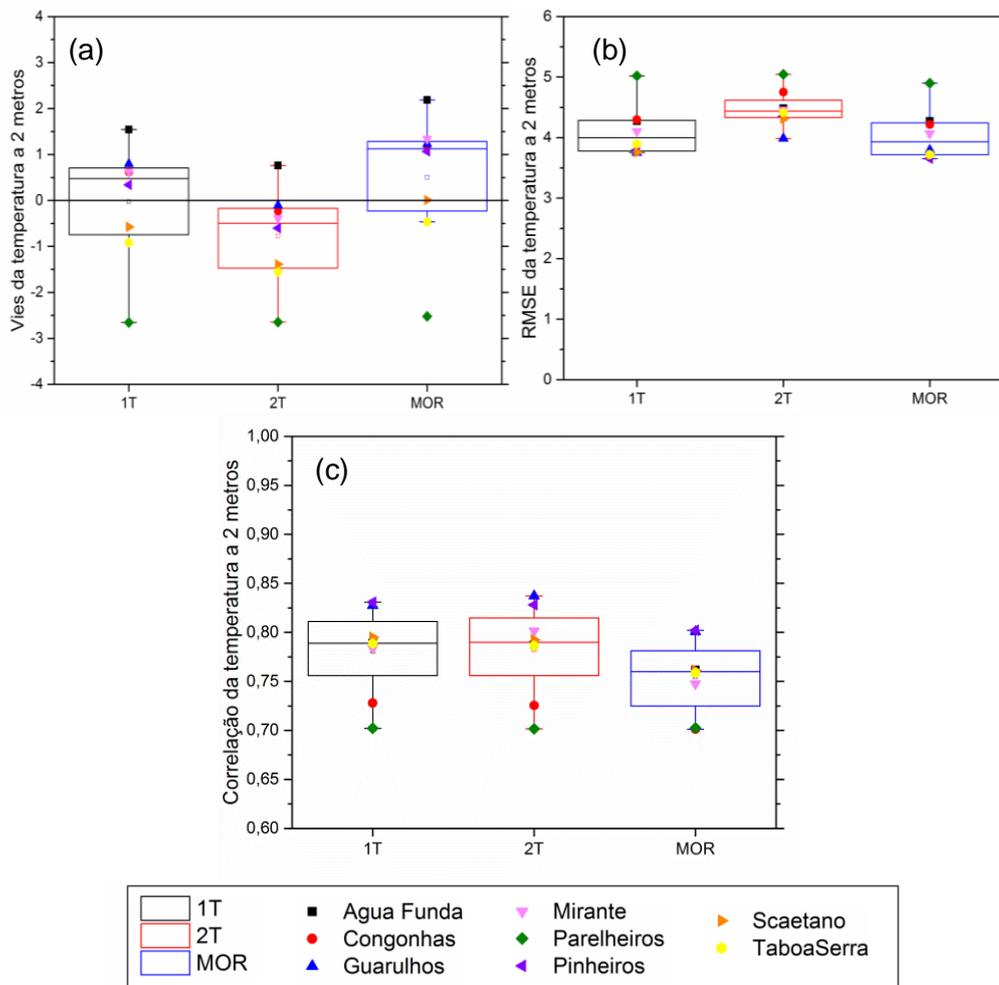


Figura 5.10 - Resultado do teste estatístico (a) Viés Médio, (b) RMSE e (c) Correlação.

Os resultados do viés médio (“*BIAS*” ou erro médio) para as simulações com o 1T e 2T demonstraram que não há valores significativamente diferentes entre si, no entanto, para a simulação com o MORUSES é observado no *boxplot* (Figura 5.10a) uma maior quantidade de valores positivos de viés, ou seja, a simulação superestima as observações.

Para o esquema 1T, os valores de viés positivos e negativos mantêm-se na mesma proporção, demonstrando que, em média, existe um padrão do erro entre a simulação e as observações, enquanto para o 2T os valores de viés são, na sua maior parte, valores negativos e para o MORUSES sua totalidade positiva. Na análise individual das estações observa-se que em algumas estações as simulações sempre apresentam o padrão de superestimar as observações ($ME > 0$), como a estação de Água Funda que apresenta viés positivo nas três simulações, porém, sendo maior para o MORUSES. Nas outras estações todas as simulações, exceto a MORUSES, subestimam as observações ($ME < 0$), como ocorre nas estações de Parelheiros, Taboão da Serra e São Caetano do Sul.

Com a análise do viés encontrou-se que a parametrização MORUSES tende a superestimar as observações na maioria das estações, exceto Parelheiros e Taboão da Serra. Por outro lado, a simulação com o esquema 2T apresenta o comportamento de subestimar as observações em todas as estações, exceto a estação de Água Funda.

A parametrização 1T é a simulação que apresenta uma tendência média de superestimar e subestimar igualmente as observações, sendo evidenciado um equilíbrio entre as estações que a simulação superestima (5 estações – Água Funda, Congonhas, Guarulhos, Mirante e Pinheiros) e subestima (3 estações – Parelheiros, Taboão da Serra e São Caetano do Sul).

De maneira geral, entre todas as estações o viés médio é de -1°C a 1°C para as simulação com o esquema 1T, de aproximadamente de $-1,5^{\circ}\text{C}$ a 0°C para a simulação com o esquema 2T e de $-0,5^{\circ}\text{C}$ a $1,5^{\circ}\text{C}$ no MORUSES. Esse erro médio possivelmente é associado à má

representação do modelo na localização topográfica das estações, que na maioria dos casos tende a subestimar os valores reais de topografia das estações. Essa posição inexata da altitude topográfica causa erros nas estimativas das variáveis pelas simulações.

Nas análises da Raiz do Erro Médio Quadrático – RMSE (Figura 5.10b) não é observado em média diferenças do RMSE médio entre a simulação 1T e MORUSES, os valores são da ordem de 3,7 a 4,5 porém atinge valores altos em algumas estações como Parelheiros (RMSE \approx 5,0). Contudo, mesmo o comportamento médio sendo similar entre as simulações 1T e MORUSES, é observado que para a parametrização com o MORUSES seis estações apresentam os menores valores de RMSE, evidenciando pequenas discrepâncias entre as observações e a respectiva simulação. Por outro lado, na simulação com o esquema 1T observa-se que a maioria das estações apresenta os valores mais elevados de RMSE.

Na análise do RMSE entre as estações são encontrados comportamentos praticamente iguais, independente da simulação. As estações de Parelheiros, Água Funda e Congonhas, são as que apresentam os maiores valores de RMSE em relação às demais estações. Em síntese, pela avaliação do RMSE é encontrado que as simulações com o 1T e o MORUSES corresponde as parametrizações que apresentam pouca discrepância entre a simulação e a observação, enquanto a parametrização do 2T mostrou-se ter um alto nível de discrepância entre a simulação e a observação.

Na análise do índice de correlação (Figura 5.10c), as simulações com o esquema 1T e 2T apresentam em média correlações muito similares entre si, da ordem de 0,75 a 0,85, enquanto a simulação do MORUSES com valores ligeiramente menores (0,70 a 0,80). Na análise das estações destacam-se as estações de Guarulhos e Pinheiros que apresentam as maiores correlações nas três simulações, além das estações que os valores não mudaram independente da simulação, como é o caso das estações de Mirante, São Caetano, Taboão da Serra e Água Funda. De

modo geral, a simulação com o esquema 2T foi a que apresentou o maior número de estações com valores de correlação superior a 0,7.

Com aplicação dos testes estatísticos nas simulações com as três parametrizações de áreas urbana (1T, 2T e MORUSES) foi possível avaliar o desempenho do modelo BRAMS e verificar a concordância das simulações com os dados da observação. Os testes mostraram uma similaridade dos resultados com as observações, de modo que, qualquer uma das parametrizações pode ser utilizada nas simulações do período de estudo. Com o intuito de escolher a parametrização que melhor represente os efeitos da área urbana, na próxima seção é avaliado o comportamento das séries temporais da temperatura entre as simulações e as observações.

5.4.1.2. Série temporal

A análise da série temporal da temperatura do ar a 2 metros para as simulações com o esquema 1T, 2T e MORUSES são mostradas na Figura 5.11 a 5.18. A comparação das simulações com as três parametrizações foram baseadas no domínio horizontal de espaçamento de 1 km para o primeiro nível do modelo (34,2 metros).

Para a análise pontual dos valores de temperatura a 2 metros são utilizados os pontos de grade mais próximos das 8 estações mencionadas no capítulo 3 (Figura 3.6 e 3.7, páginas 36 e 37, respectivamente). Isto ocasiona uma fonte de erro em decorrência dos dados obtidos pela modelagem não corresponderem ao ponto real das observações, adicionado ao fato que o modelo representa uma média no ponto de grade. Outra fonte erro refere-se a correção da altitude topográfica. Em média, os modelos numéricos tendem a subestimar a altitude exata das estações, o que, tipicamente, faz com que as temperaturas modeladas sejam mais altas em relação aos valores observados. Para corrigir este erro sistemático, o valor do viés médio de cada estação e simulação (Tabela 5.6) foi subtraído dos resultados de cada simulação para o respectivo ponto da estação.

A comparação entre as observações e as simulações para as 8 estações apresentadas nas Figuras 5.11 a 5.18 já correspondem aos valores de temperatura a 2 metros corrigidos com o viés.

Na análise da evolução temporal da temperatura estimada pelo modelo e observada verifica-se, de modo geral, que as simulações com as três parametrizações reproduzem satisfatoriamente os picos de máxima e mínima temperatura no ciclo diurno, sendo que as intensidades das temperaturas máximas são melhores representadas pela simulação do que os valores mínimos. Em geral, observa-se que as simulações subestimam as temperaturas mínimas. Com relação ao horário de ocorrência de máximos e mínimos, as três simulações representam satisfatoriamente à fase dos máximos e mínimos de temperatura.

Na avaliação individual das parametrizações é observada que as simulações com o esquema de duas camadas (2T e MORUSES) foram as que melhores reproduziram os valores de máxima temperatura na maioria das estações. Contudo, os resultados da simulação com o MORUSES mostraram mais similaridades com as observações, isso é observado principalmente nas estações de Pinheiros (Figura 5.11), São Caetano do Sul (Figura 5.13), Guarulhos (Figura 5.14), Congonhas (Figura 5.15), Mirante (Figura 5.16), Água Funda (Figura 5.17) e Taboão da Serra (Figura 5.18). Com relação à temperatura mínima quase todas as parametrizações não reproduziram adequadamente as mínimas, entretanto, a simulação com o MORURES para o dia 30/09, observa-se que as temperaturas mínimas coincidem com as observações, principalmente nas estações Pinheiros (Figura 5.11), São Caetano do Sul (Figura 5.13) e Taboão da Serra (Figura 5.18).

Uma característica importante na representação das simulações é evidenciada na estação de Parelheiros (Figura 5.12), cuja localização no modelo é representada por área vegetada (segundo o mapa de uso do solo, Figura 5.9), os resultados das simulações com todas as parametrizações urbanas são idênticas, uma vez que as mesmas não são ativadas neste caso.

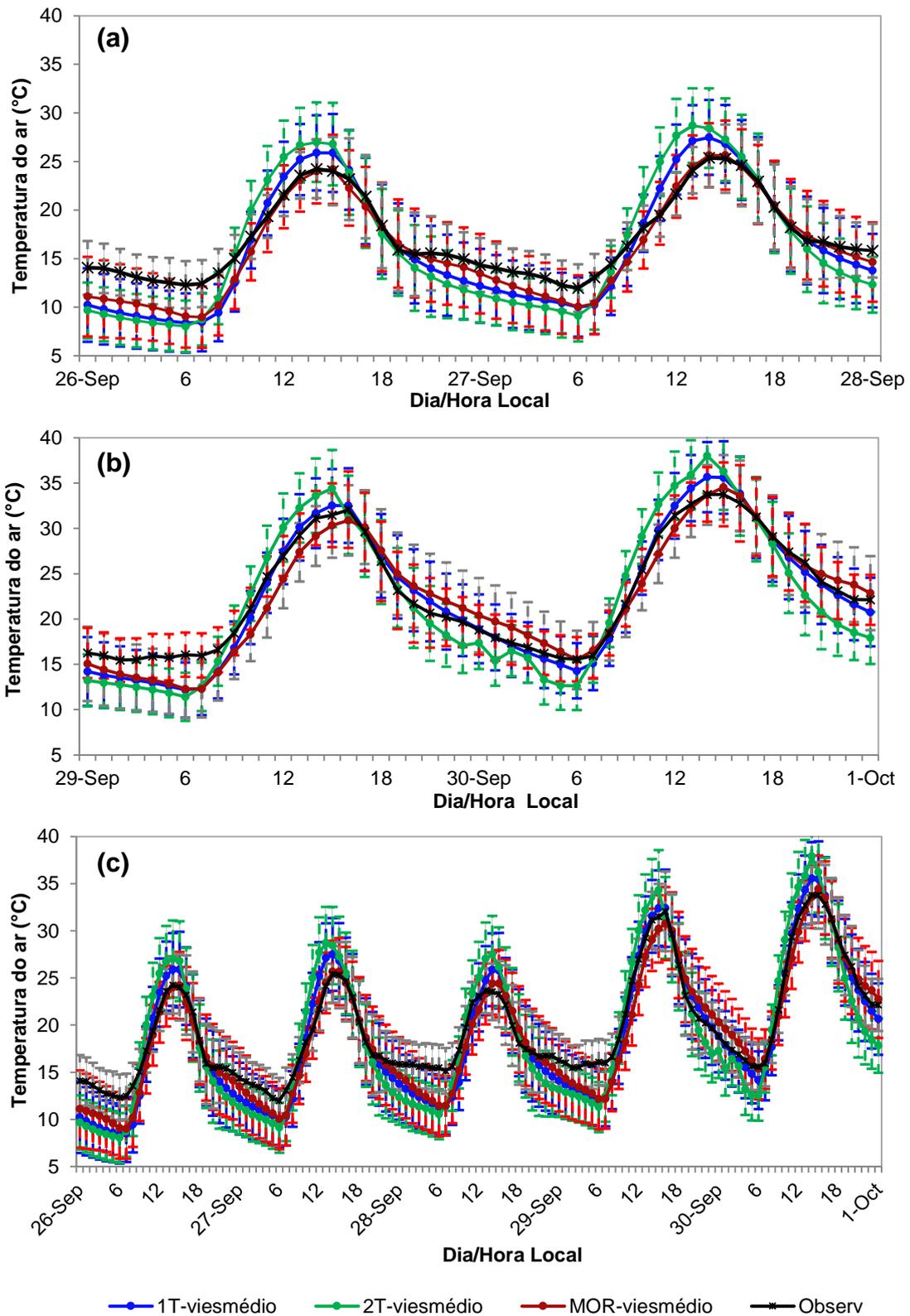


Figura 5.11 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros na estação de Pinheiros para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

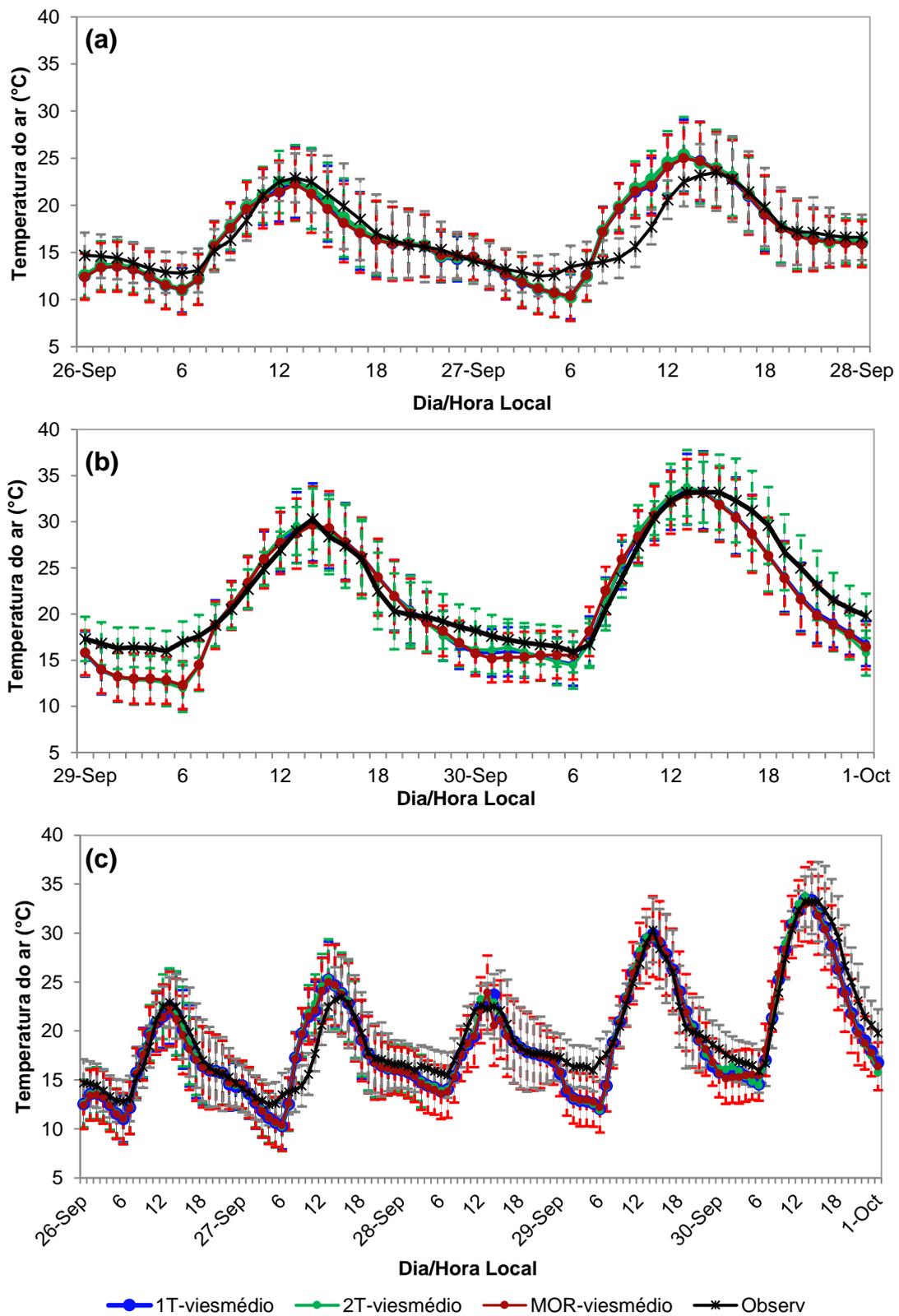


Figura 5.12 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros para a estação de Parelheiros para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

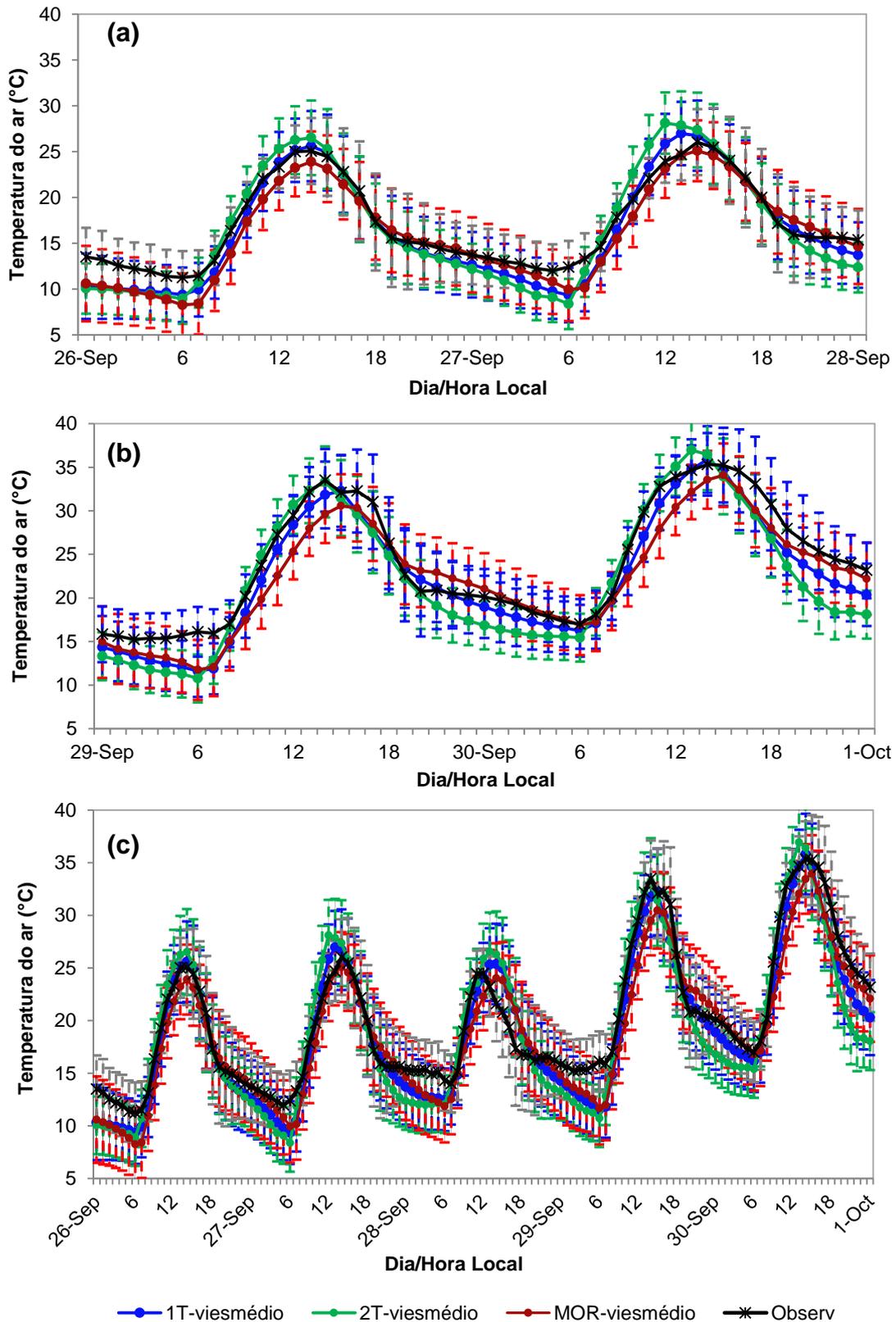


Figura 5.13 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de São Caetano do Sul para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

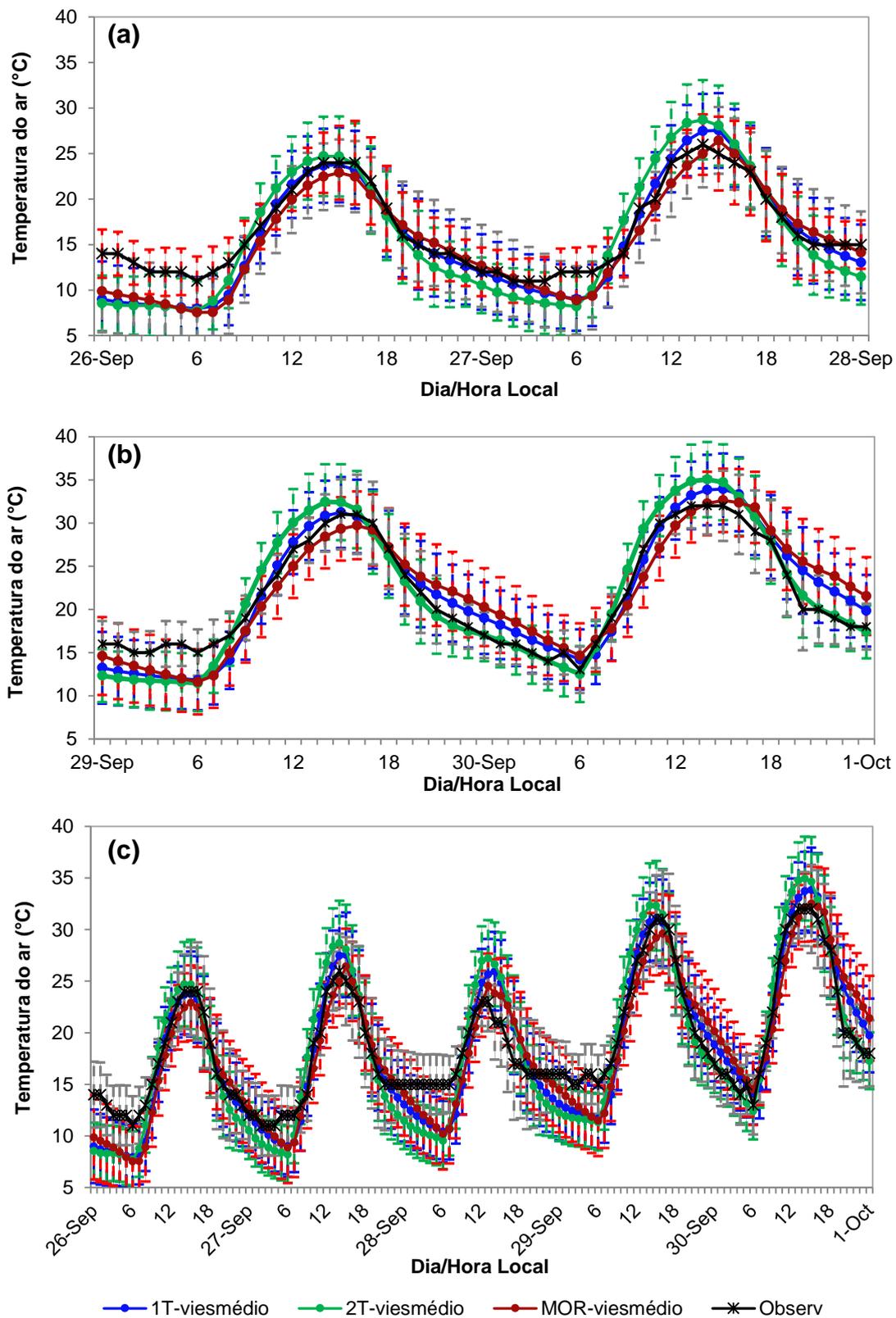


Figura 5.14 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Guarulhos para as simulações com o 1T, 2T e MORUS nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

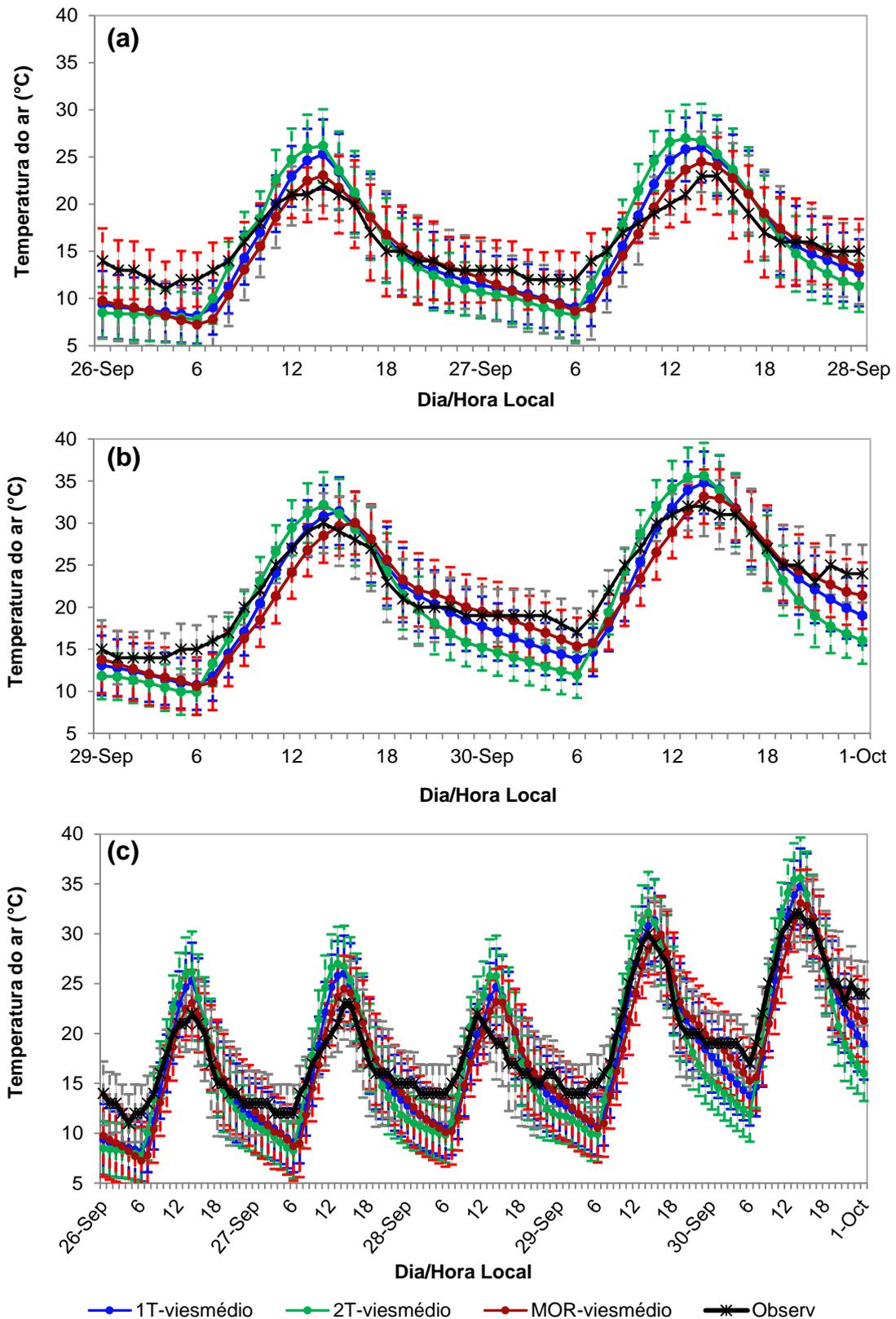


Figura 5.15 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Congonhas para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

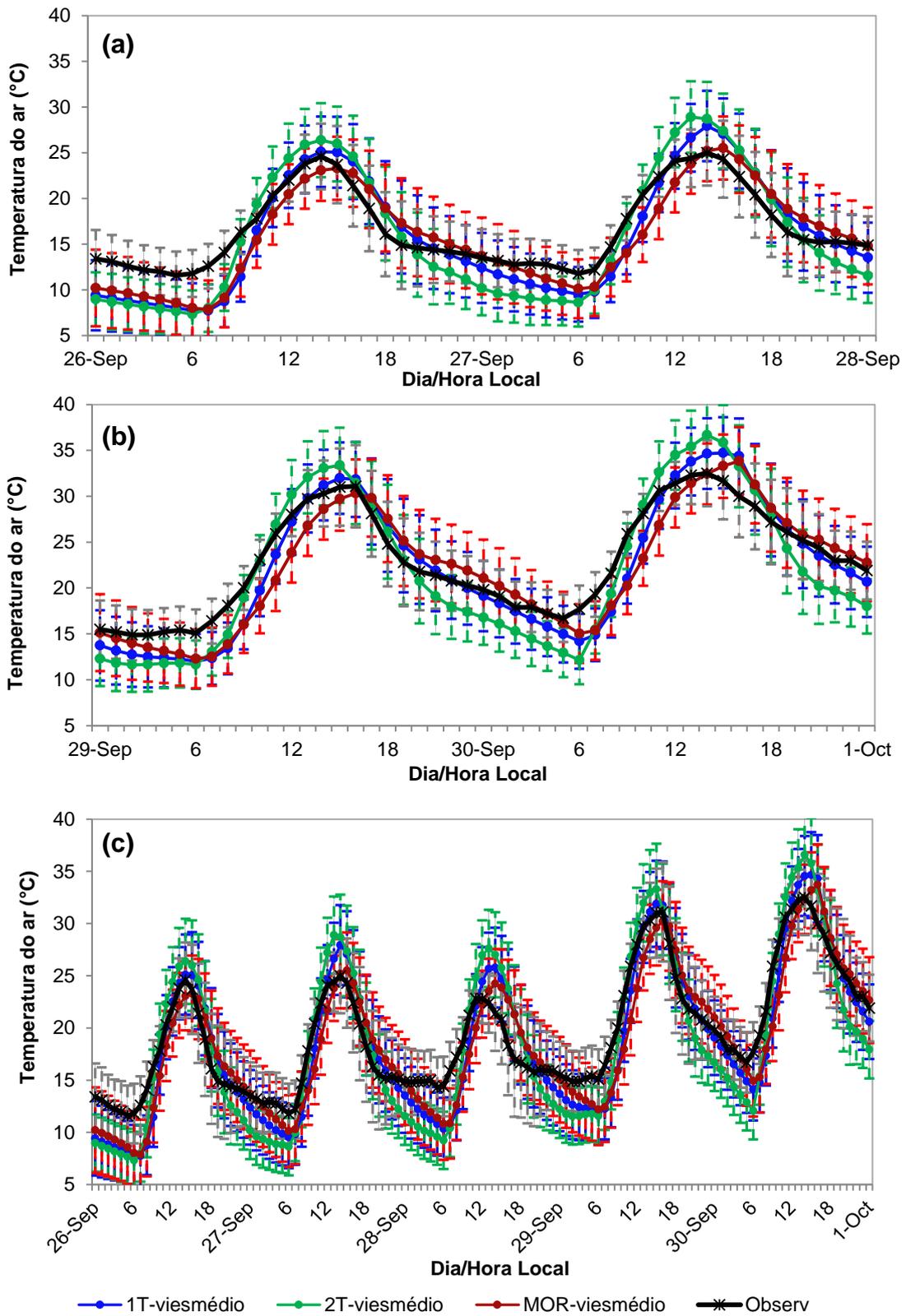


Figura 5.16 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Mirante para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (b) 29 a 30 de setembro e (c) 26 a 30 de setembro.

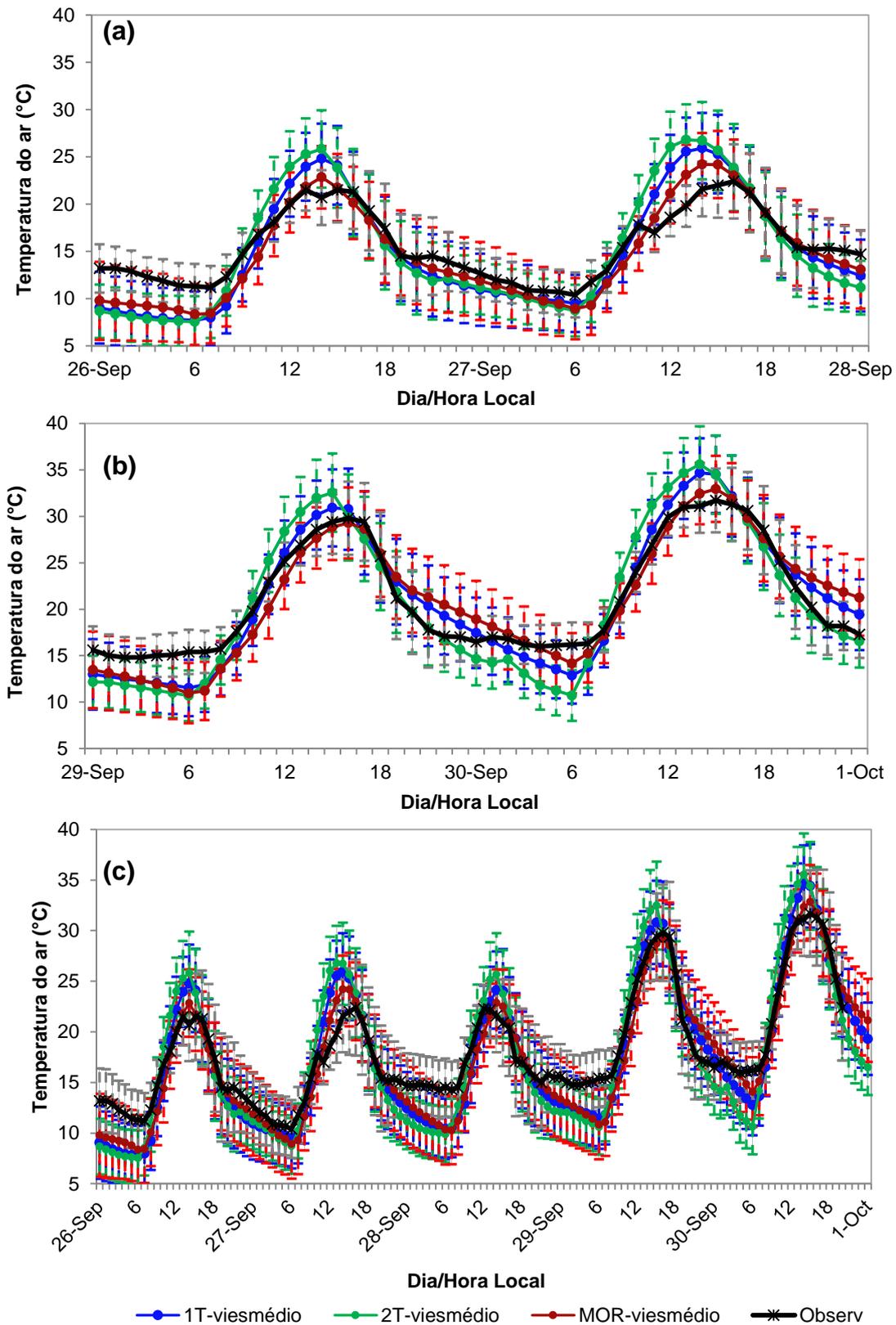


Figura 5.17 - Série temporal da temperatura do ar para a estação de Água Funda para as simulações com o 1T, 2T e MORUS nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (b) 29 a 30 de setembro e (c) 26 a 30 de setembro.

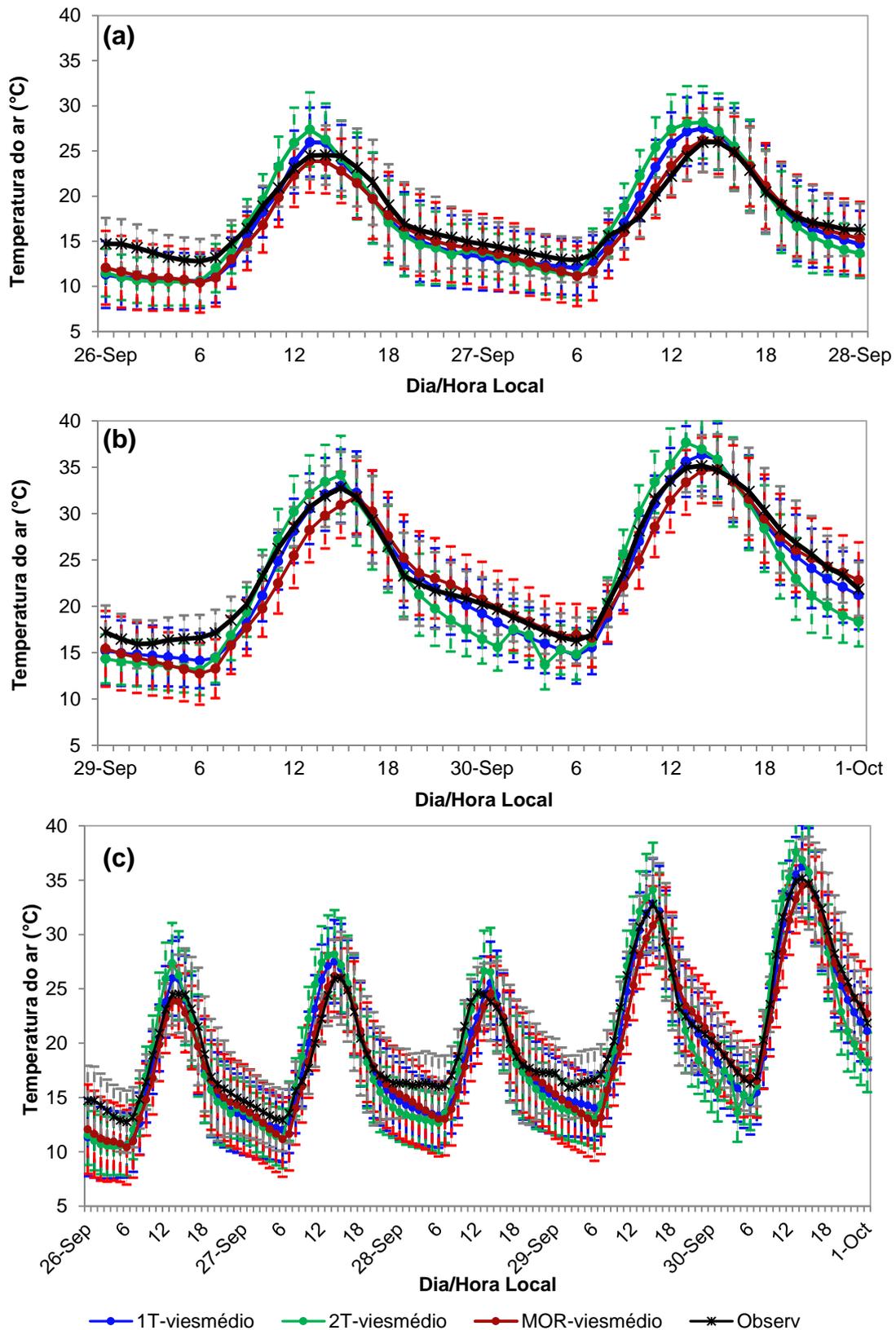


Figura 5.18 - Série temporal da temperatura do ar a 2 metros na estação de Taboão da Serra para as simulações com o 1T, 2T e MORUSES nos períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

Na análise da evolução temporal da temperatura a 2 metros para as simulações com os três esquemas urbanos, verificou-se que o modelo BRAMS é capaz de representar satisfatoriamente o ciclo diário de temperatura no referido período para as estações da área urbana da RMSP. Contudo, os resultados da temperatura para a parametrização com representações urbanas mais detalhadas, como é o caso do esquema 2T e MORUSES (configuração do cânion e telhados), mostraram-se consideravelmente melhores quando comparado com as observações. Adicionalmente, os testes estatísticos mostraram que as simulações com o 2T e o MORUSES apresentaram melhor concordância com as observações.

A Figura 5.19 representa o ciclo diurno médio da intensidade da ilha de calor no período total de estudo (26/09 a 30/09) obtido com os resultados das simulações e da observação. Os comportamentos médios da IICU nas simulações demonstram o mesmo padrão diurno anual e sazonal da IICU que foi apresentado e discutido no Capítulo 3.

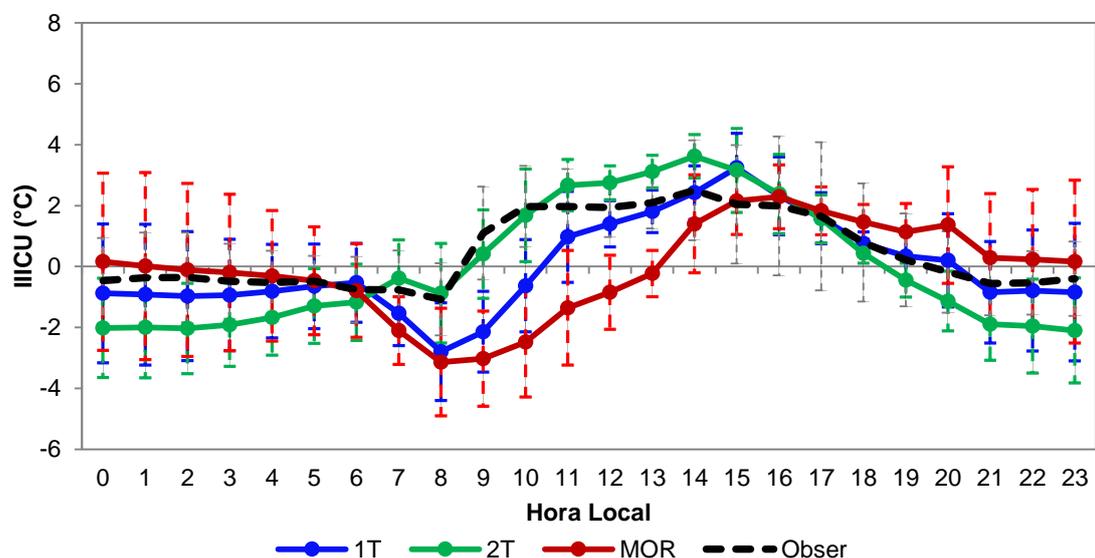


Figura 5.19 - Ciclo diurno médio da IICU estimado pela observação e pelas simulações com o 1T, o 2T e o MORUSES.

A intensidade máxima da IICU ocorre entre 13HL e 15HL na simulação com o esquema 2T, entre as 14HL e 16HL na simulação com o esquema 1T, e com MORUSES há um atraso na ocorrência da máxima IICU (de cerca de 2 horas), ocorre por volta das 15HL e 17HL. No que se refere à

intensidade, as simulações com os esquemas 1T e 2T superestimam a IICU, com valores de aproximadamente 3,0°C, enquanto a MORUSES apresenta valores 2,0°C; muito similares a observação (2,5°C). Com relação à ocorrência das mínimas intensidades, todas as três simulações coincidem com o horário (08HL). Sendo as parametrizações 1T e MORUSES com valores de IICU mais baixos (aproximadamente de -3,0°C) enquanto a parametrização do esquema 2T apresenta valores de IICU (~ -1,0°C) semelhante as mínimas da IICU da observação (~ -1,0°C).

A Figura 5.20 ilustra a análise comparativa entre a IICU observada e a IICU simuladas com os esquemas urbanos para os dois casos de estudo (Figura 4.20 (a) e (b)) e para o período completo (Figura 4.20(c)). Destaca-se entre os dois casos, que a média da IICU observada no segundo caso foi de cerca de 3,5°C, enquanto que a IICU observada no primeiro caso foi de 2,6°C em média, evidenciando que nos dias 29 e 30 o aquecimento da superfície na RMSP é maior, portanto uma IICU mais intensa. Quanto a comparação entre as observações e as simulações é verificado para o primeiro caso de estudo (26/09 a 27/09) que as simulações reproduzem de maneira satisfatória a fase do ciclo diurno da IICU (Figura 5.20 (a)), exceto o horário da mínima no dia 27/09 as 09HL que não coincide com a observação. No entanto, as intensidades máximas da IICU parecem ser superestimadas e as mínimas subestimadas. Dentre as parametrizações, o esquema 2T foi a simulação que melhor representou o ciclo diurno da IICU nos horários e na intensidade da máxima e mínima, apesar de superestimar no dia 26/09 e subestimar dia 27/09.

Por outro lado, no segundo caso de estudo a representação da IICU não foi bem reproduzida como no primeiro caso (Figura 4.20 (b)). O esquema 2T foi a simulação que mais coincidiu com o ciclo da IICU observada. O esquema 1T subestimou os valores de máxima e mínima, enquanto o MORUSES superestimou as máximas e subestimou as mínimas da IICU em ambos os dias, além de não representar os mesmos horários de máxima e mínima da IICU observada.

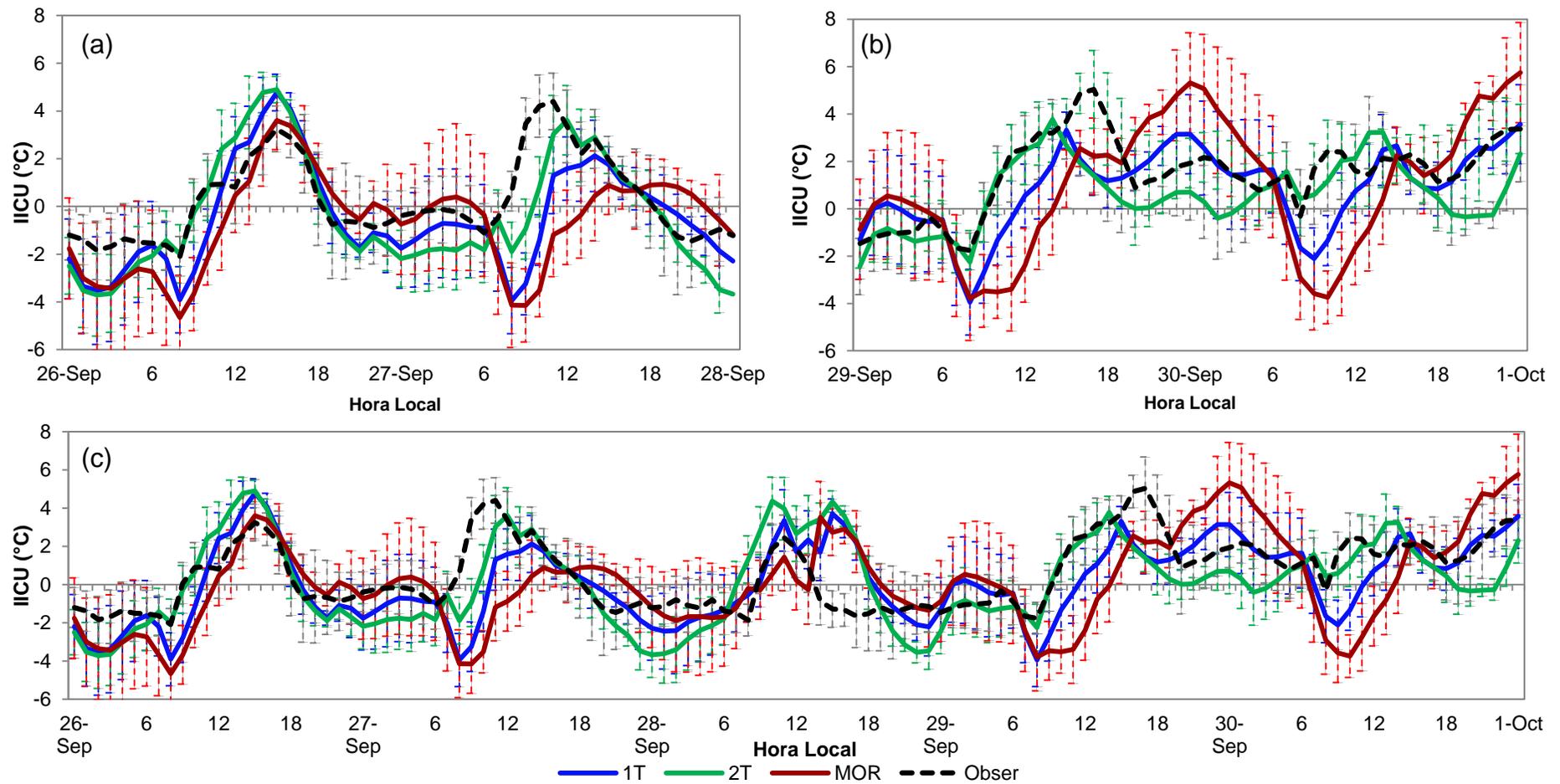


Figura 5.20 - Série temporal da IICU estimada pela observação e pelas simulações com o 1T, 2T e MORUSES para os períodos de (a) 26 a 27 de setembro, (a) 29 a 30 de setembro e (a) 26 a 30 de setembro.

5.4.1.3. Padrão espacial

Nesta seção analisa-se o campo horizontal de temperatura a 2 metros e o padrão de circulação dos ventos nas simulações com os esquemas urbanos com o objetivo de verificar a eficiência das parametrizações no aquecimento da superfície, e, portanto, na formação e desintensificação da ICU.

A análise para as simulações com o esquema 1, esquema 2T e MORURES referentes ao primeiro caso de estudo, dias 26 e 27 de setembro de 2011 é analisado apenas para o dia 26 de setembro, e no segundo caso de estudo, dias 29 e 30 de setembro será analisado apenas o dia 29, são mostradas respectivamente nas Figuras 5.21 a 5.24 e Figuras 5.25 a 5.28, cuja linha correspondem as parametrizações e as colunas os horários de análise.

As Figuras 5.21 e 5.24 descrevem o campo de temperatura e vento para um ciclo diário de 00HL a 21HL do dia 26. Na madrugada e início da manhã do dia 26 nos horários das 00HL as 06HL (Figura 5.21 e 5.22) não são verificadas diferenças significativas no campo de temperatura e vento para as três simulações. O predomínio dos ventos associados a brisa terrestre na RMSP é característico em todas as simulações, além de valores de temperatura inferiores a 22°C.

Entre as 06HL e 09HL (Figura 5.22) a circulação dos ventos associada a brisa terrestre começa a enfraquecer e assim a brisa marítima começa a surgir, com isso há uma estagnação dos ventos na RMSP destacando uma calmaria da intensidade na área central da RMSP as 09HL. Tal comportamento é observado principalmente nas simulações 1T (Figura 5.22(a) e (b)) e MORUSES (Figura 5.22(e) e (f)). Nesse horário, nenhum padrão térmico ainda se destaca no campo de temperatura.

No dia 26 as 12HL (Figura 5.23) já são evidenciadas núcleos de temperaturas altas no centro e fora da área urbana da RMSP em todas as simulações, de cerca de 22°C a 26°C, sendo que a simulação com o MORUSES (Figura 5.23e) as temperaturas são mais amenas entre 22°C

a 24°C no centro da RMSP. A brisa marítima se configura na RMSP, contudo é perceptível que ela não avança depois da latitude de 23,6°S. Isso indica que a presença da área urbana e a intensificação da temperatura no centro dessa área intervêm, de modo que, a brisa não se propague.

Para as 15HL (Figura 5.23) as temperaturas já estão mais configuradas no centro da área urbana da RMSP, com valores de 24 a 26°C e nas simulações com o esquema 1T (Figura 5.23b) e 2T (Figura 5.23c) são encontrados núcleos de até 26°C a 28°C. A brisa marítima já adentra a área urbana ultrapassando a latitude de 23,6°S e causando uma confluência dos ventos nessa região.

Nos horários de 18HL a brisa marítima já avança sobre toda a RMSP e não são observados núcleos de temperatura maiores que 22°C (Figura 5.24). No entanto, na simulação com o MORUSES (Figura 5.24e) ainda é observado temperaturas de 22°C a 24°C em poucas regiões urbanas próximo à costa marítima.

As 21HL (Figura 5.24) nas três simulações a brisa marítima começa a se enfraquecer e mudar a configuração para a brisa terrestre.

Como análise geral do campo de temperatura e vento para o dia 26 de setembro, as temperaturas na RMSP mostraram ser amenas em todas as simulações, sendo as parametrizações com o esquema 1T e 2T com as melhores representações de núcleos mais quentes na RMSP. A circulação decorrente das brisas é representada muito bem nas três simulações

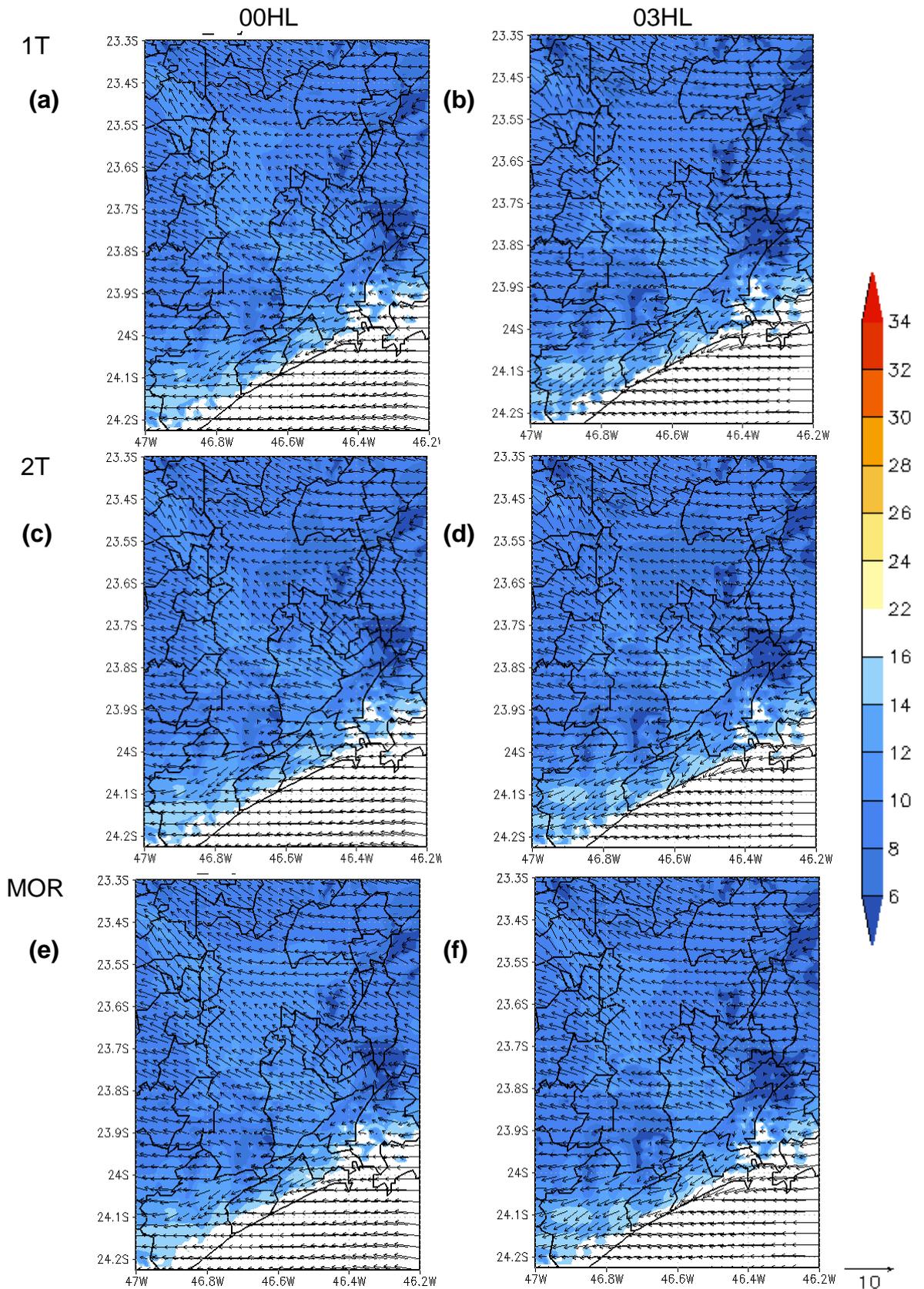


Figura 5.21 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

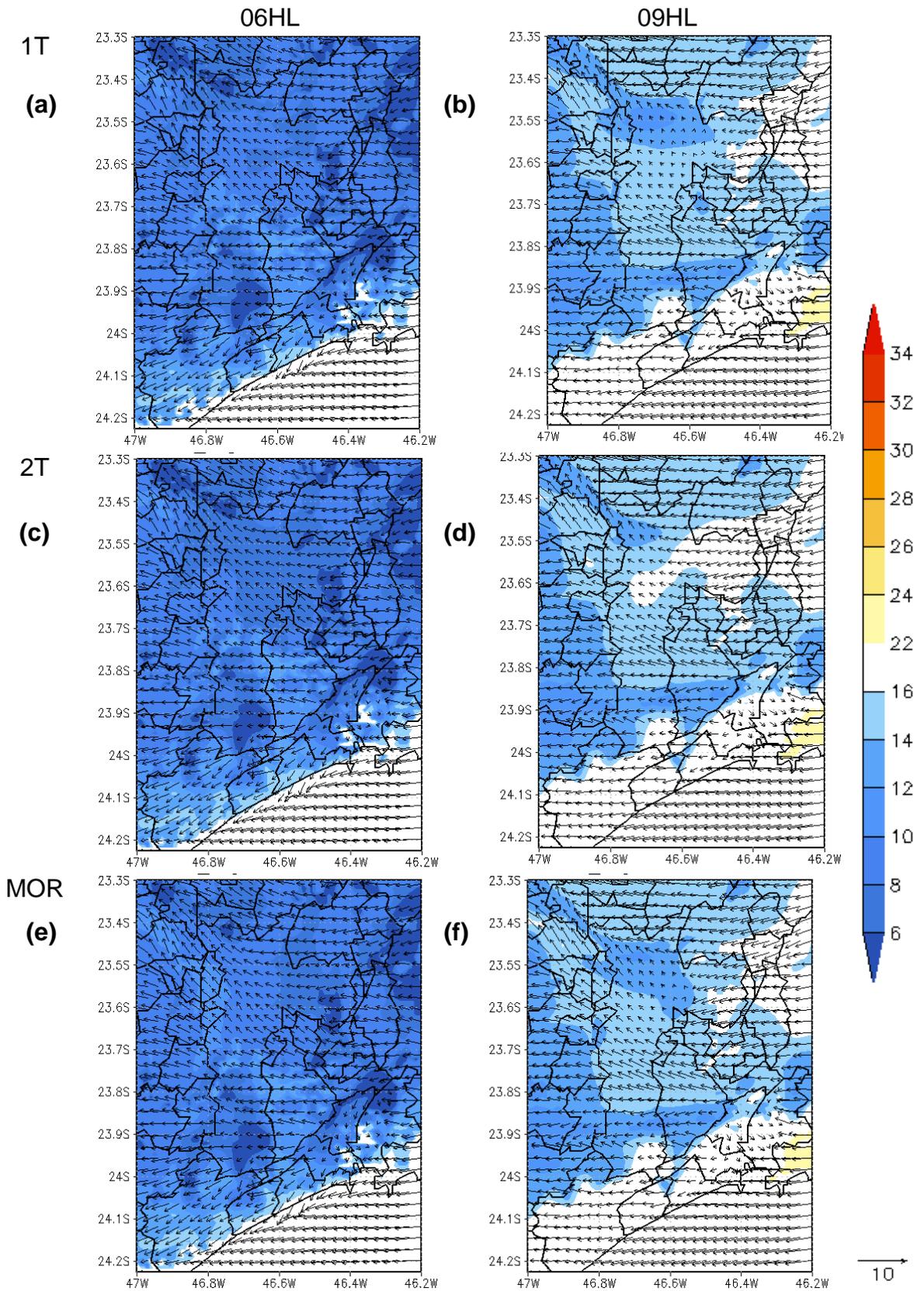


Figura 5.22 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

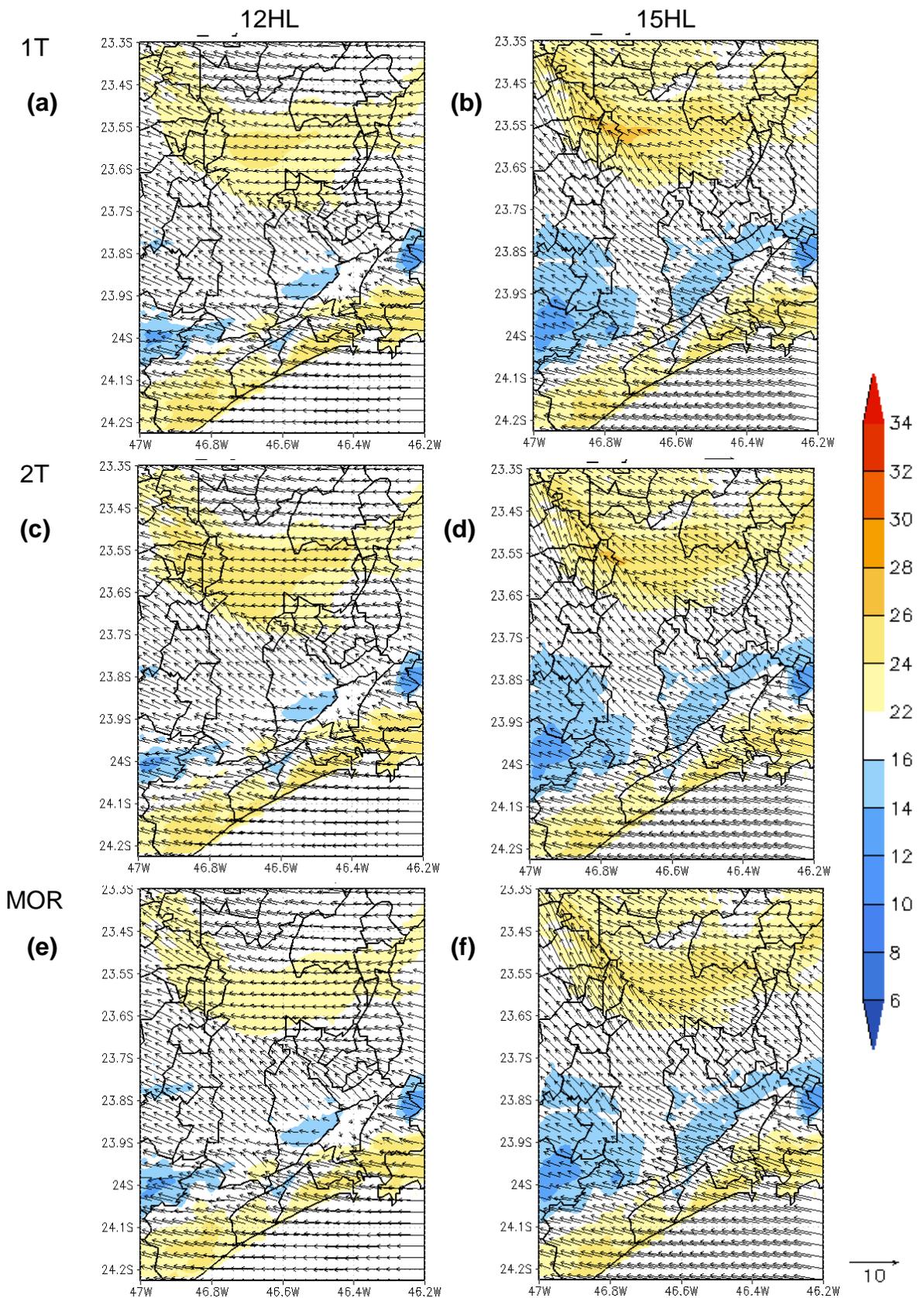


Figura 5.23 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

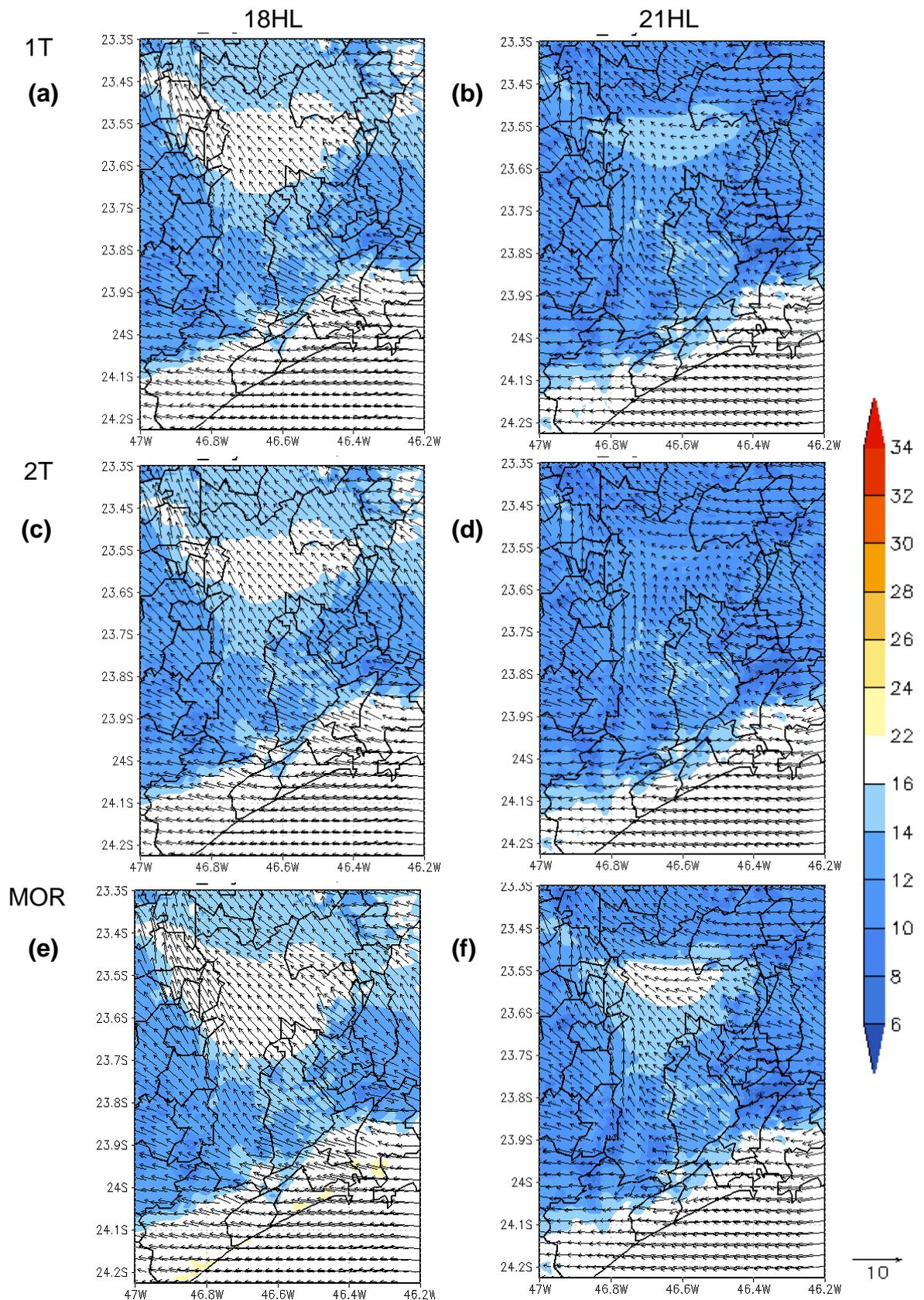


Figura 5.24 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 26 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

Para o segundo período de estudo (29 e 30 de setembro), a análise espacial foi realizada apenas para o dia 29 de setembro (Figuras 5.25 a 5.28). Nos horários das 00HL a 06HL é observada nas três simulações o predomínio da circulação de brisa terrestre característico desses horários, além disso, para esse dia é perceptível uma calmaria dos ventos no centro da área urbana na RMSP (Figuras 5.25 e 5.26).

Entre as 06HL e 09HL, a circulação dos ventos já se altera da brisa terrestre para a brisa marítima. Diferentemente ao dia 26, as 09HL do dia 29 já são encontradas temperatura elevadas na RMSP (Figura 5.26). A brisa marítima começa a se formar, porém é observada em todas as simulações que o centro da RMSP ainda permanece com ventos calmos e até mesmo uma estagnação.

As 12HL (Figura 5.27) do dia 29 de setembro todas as simulações já evidenciam temperatura elevadas na RMSP, de até 28°C. Com o centro da área urbana da RMSP apresentando valores mais intensos nas simulações com esquema 1T e 2T, de cerca de 28°C a 30°C, sendo o esquema 2T alcançando valores de até 32°C. Nesse horário observar-se a entrada da brisa marítima na RMSP em todas as simulações, no entanto, destaca-se a simulação 2T (Figura 5.27c) que evidencia o deslocamento da brisa mas não ultrapassa a latitude de 23,65°S. Além disso, o predomínio da calmaria dos ventos no centro da área urbana é representado na simulação 1T (Figura 5.27a) e 2T (Figura 5.27e), o que favorece a intensificação da temperatura.

No horário das 15HL (Figura 5.27), o centro da área urbana da RMSP já demonstra temperaturas significativamente elevadas de cerca de 32°C a 34°C nas simulações como esquema 1T (Figura 5.27b) e 2T (Figura 5.27d), enquanto na simulação com o MORUSES (Figura 5.27f) a temperatura atinge valores de 30°C.

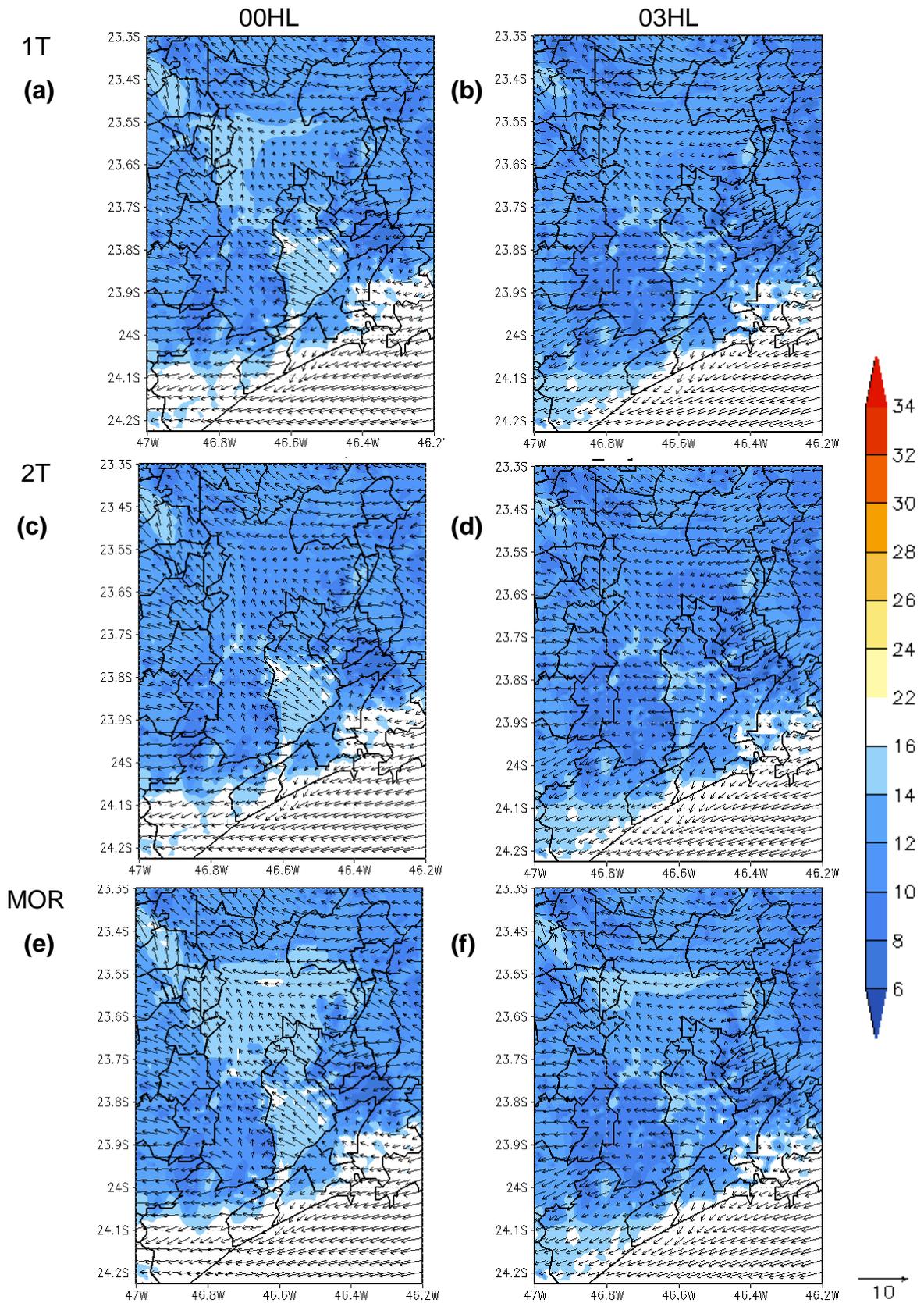


Figura 5.25 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

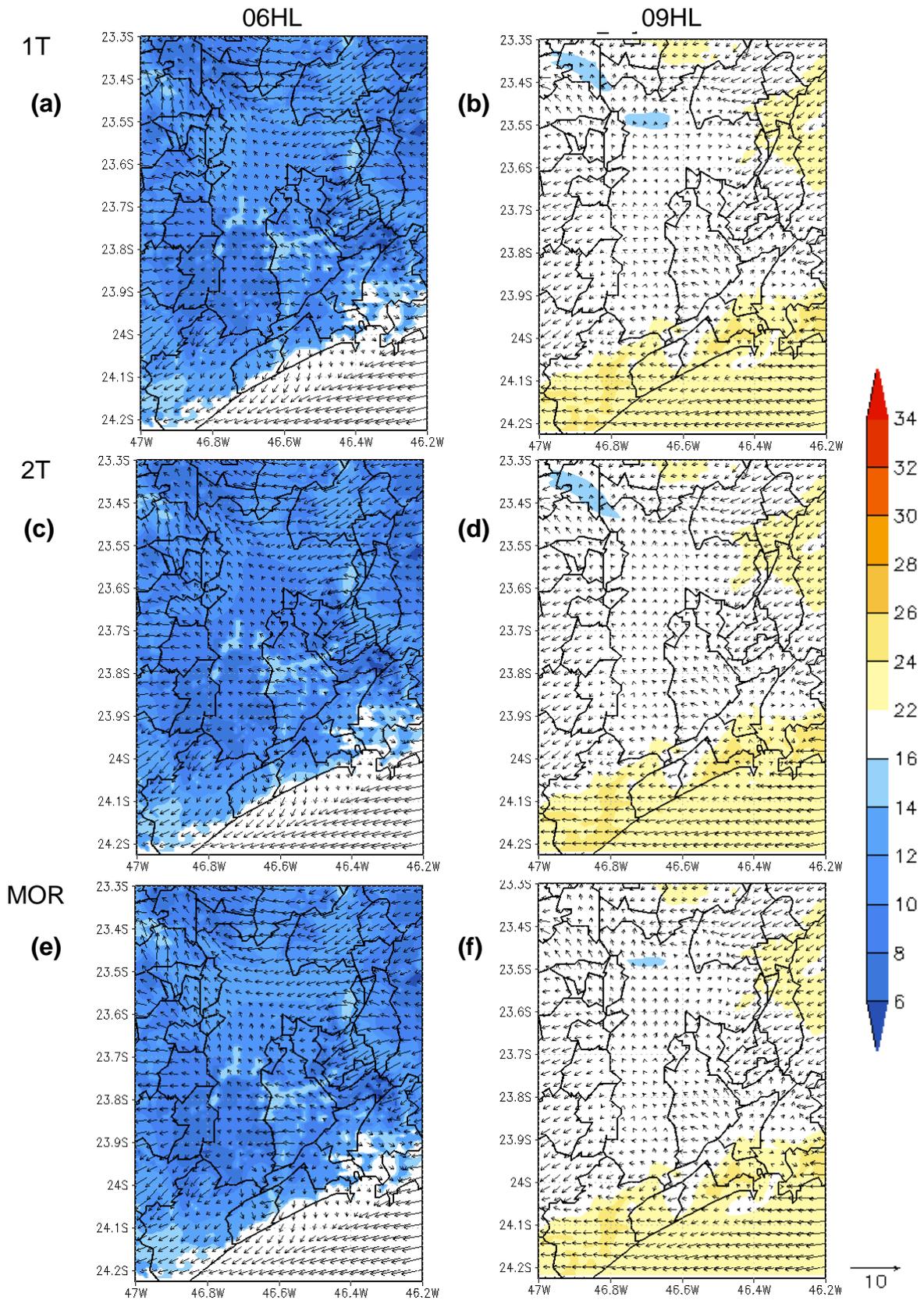


Figura 5.26 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

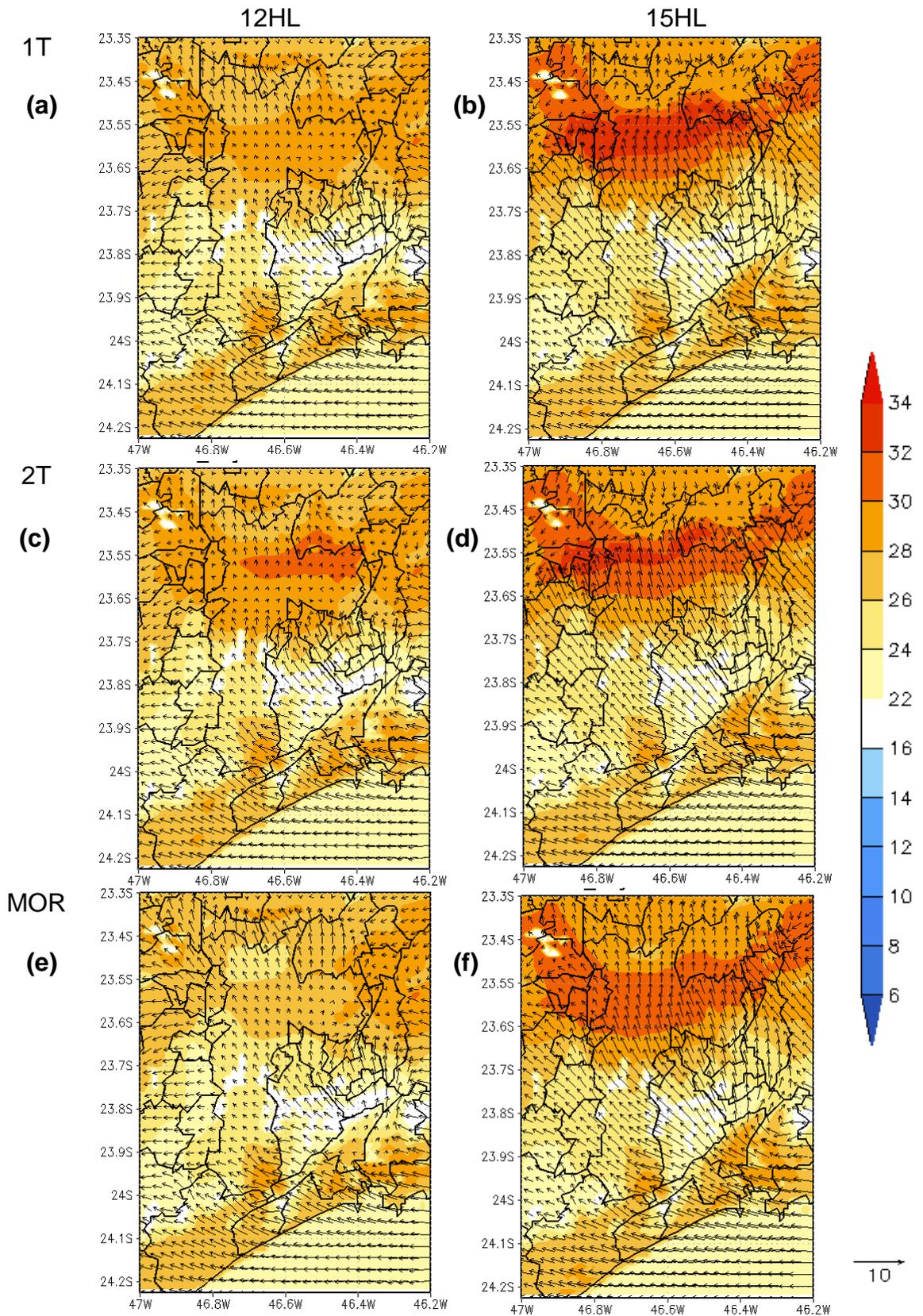


Figura 5.27 - Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

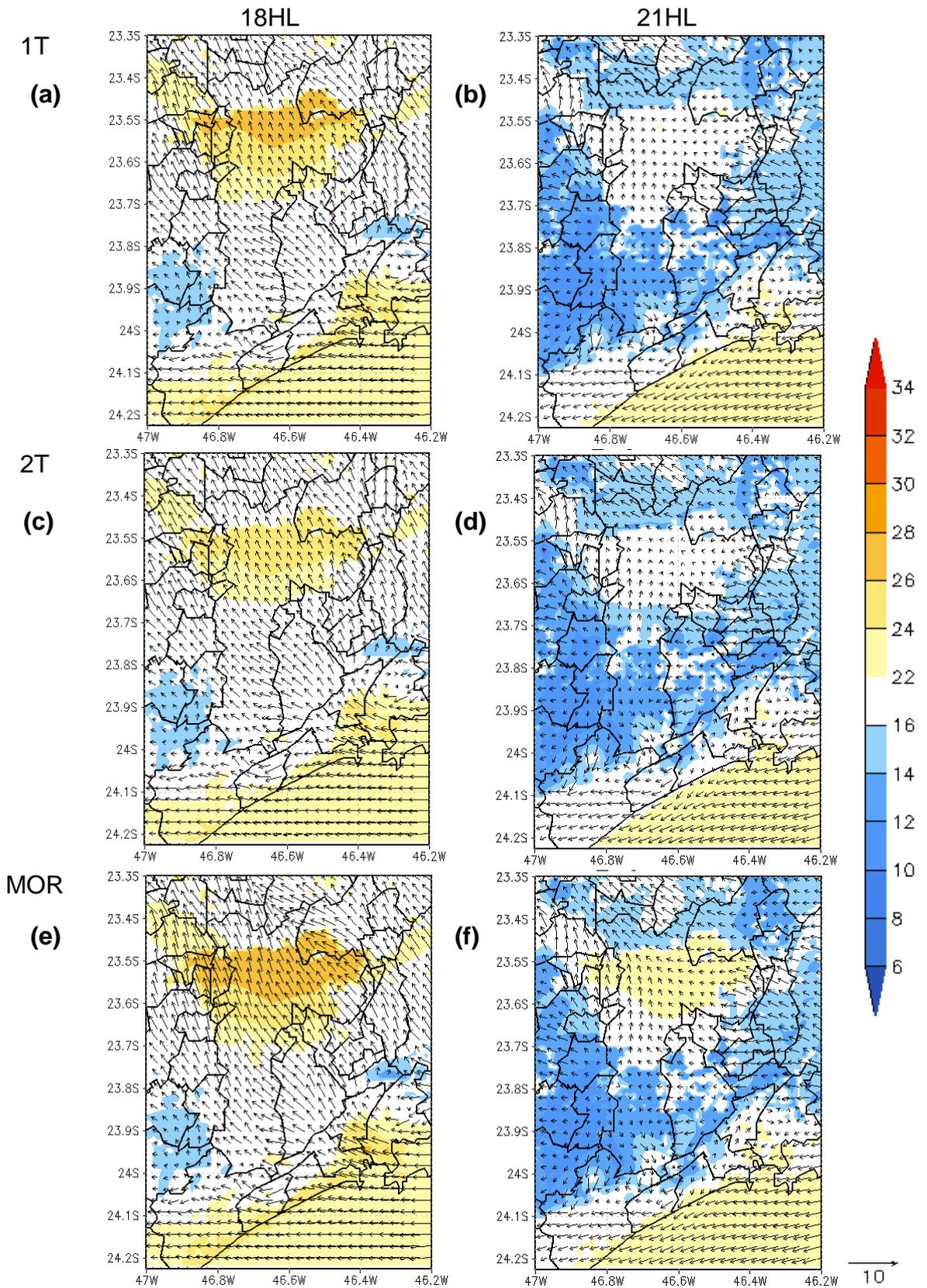


Figura 5.28 – Distribuição espacial da temperatura e vento na RMSP ao nível de 34,2 m no dia 29 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para os esquemas 1T (a) e (b), 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

A brisa marítima é bem marcada no campo espacial as 15HL nas três simulações. Uma característica importante observada apenas nas simulações 1T (Figura 5.27b) e 2T (Figura 5.27d) é o padrão de confluência do vento em superfície em torno da latitude de 23,5°S. Essa convergência dos ventos em superfície ocasiona os movimentos verticais (correntes ascendentes) característicos da brisa urbana. Na simulação do MORUSES (Figura 5.30f) nesse horário observa-se que a brisa já avança sobre toda a RMSP, essa confluência dos ventos sobre a área urbana, que é encontrada as 15HL no esquema 1T e 2T, é observado as 14HL na simulação do MORUSES (figura não mostrada aqui).

No horário subsequente, as 18HL (Figura 5.28), o centro da RMSP ainda apresenta valores de temperatura elevados (28°C a 30°C), contudo na simulação com o esquema 1T (Figura 5.28a) e MORUSES (Figura 5.28e) ainda são observadas núcleos de temperatura de 30°C a 32°C. Além disso, no MORUSES é possível observar que a distribuição espacial desse núcleo quente é maior comparado com o esquema 1T. Nesse horário a brisa marítima avança sobre toda a RMSP, destacando-se a simulação com MORUSES que parece apresentar uma circulação de brisa mais intensa.

Para o horário das 21HL (Figura 5.28), a simulação com o MORUSES (Figura 5.28f) ainda marca a presença de um núcleo quente com valores de temperatura de cerca de 22 a 24°C sobre a área urbana da RMSP. O que evidencia que esse esquema possui a característica de reter (aprisionar) o calor nas regiões urbanas por mais tempo. A circulação da brisa marítima começa a se desconfigurar e mudar-se. Adicionalmente, vale destacar os altos valores de temperatura sobre o oceano Atlântico nesse período, indicando o predomínio de TSM quentes.

Na análise do dia 29 de setembro, em síntese foi evidenciado que os valores máximos de temperatura ocorrem por volta das 15HL em todas as simulações. Ainda nesse horário, destaca-se que a simulação com o esquema 1T e 2T que apresentaram os valores mais elevados de temperatura (32°C a 34°C), principalmente no centro da RMSP. No

horário das 18HL e 21HL observou-se que as simulações 1T e MORUSES ainda apresentam altas temperaturas na área urbana da RMSP. Entretanto, com o MORUSES observa-se que a ICU é mais intensa e com maior extensão horizontal, devido ao calor aprisionado na RMSP. Na análise do vento no período da madrugada e manhã (00HL às 09HL) observa-se a predominância da brisa terrestre em todo o domínio. Entre as 09HL e 12HL verifica-se a propagação da frente da brisa marítima com ventos de direção Sudeste ao longo de quase toda a RMSP, porém não ultrapassando a latitude de 23,65°S. Às 15HL a brisa marítima se intensifica em decorrência do aumento do gradiente de temperatura e avança mais para dentro do continente. Neste horário ainda observa-se um padrão de confluência do vento no centro da RMSP nas simulações com o esquema 1T e 2T, tal circulação característica da ICU (brisa urbana). No horário das 18HL e das 21HL, a brisa marítima se desintensifica e novamente um ciclo reverso se inicia.

5.4.1.4. Padrão vertical

Como descrito anteriormente, os dias 26 e 29 de setembro foram escolhidos como representativos dos casos de estudo. Assim, para avaliar o comportamento vertical da temperatura e do vento nesses dias foram realizadas duas análises de perfil vertical. Na primeira análise, um corte longitudinal foi feito na RMSP e para a segunda análise é observado o perfil vertical de pontos de latitude e longitude fixas da RMSP.

Para a primeira análise, o corte longitudinal foi baseado no campo horizontal de temperatura e vento apresentado na seção anterior, onde se observou núcleos de temperaturas elevadas no centro da área urbana. A análise vertical foi realizada para o domínio horizontal de 1 km a partir de uma longitude fixa, correspondente a longitude 43,7°W.

O ciclo diário de 00HL as 21HL do dia 26 para o primeiro caso de estudo e o ciclo diário de 00HL as 21HL do dia 29 para o segundo caso de estudo foram avaliados, de modo que, pode se observar o comportamento da temperatura e do vento durante os horários de

elevação e declínio da temperatura, caracterizando o ciclo da ICU, assim como, a identificação a circulação da brisa urbana associada ao fenômeno da ilha de calor e as influência das circulações de brisa marítima e terrestre na RMSP.

A Figura 5.29 (a) e (b) ilustram a posição do corte realizado no centro da área urbana (região em vermelho na figura) e o perfil de topografia longitudinal, respectivamente. Destaca-se que a RMSP está localizada em altitudes elevadas de cerca de 600 a 700 metros a nível do mar, delimitada pela Serra da Cantareira ao norte e o Pico do Jaraguá no extremo oeste da Serra da Cantareira e ao sul pela Serra do Mar. As regiões de Serras estão marcadas no corte longitudinal da Figura 5.29.

As Figuras 5.30 a 5.34 e Figuras 5.35 a 5.38 ilustram, respectivamente, a análise vertical para os dias 26 e 29 de setembro, onde o eixo vertical representa a variação dos níveis verticais de altura em metros e a horizontal representando a variação das latitudes.

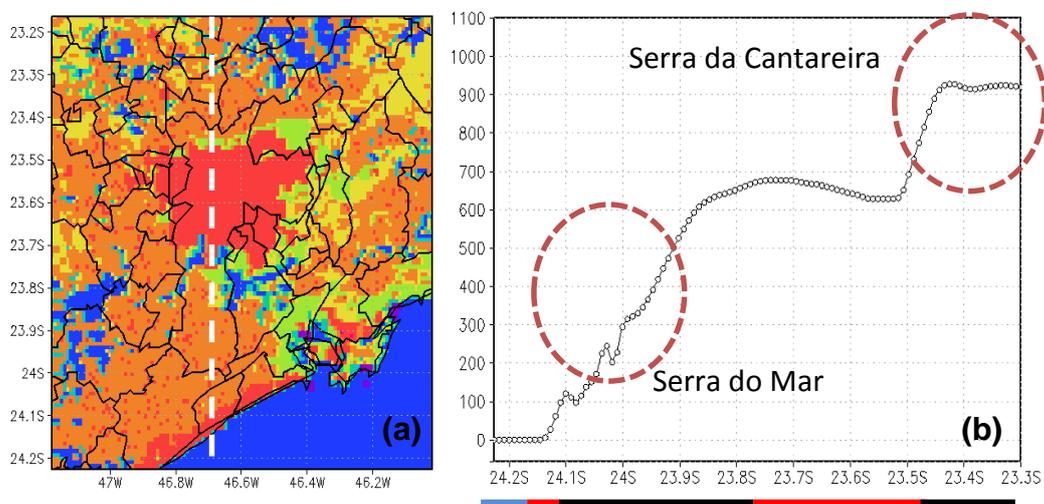


Figura 5.29 – (a) Mapa de uso do solo com a localização do corte na longitude de 46,7°W, onde região em vermelho indica a área urbana (b) perfil de topografia do corte longitudinal. Destaca-se ao sul a Serra do Mar e ao norte a Serra da Cantareira. A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

No dia 26 de setembro para o período da madrugada até início da manhã (00HL as 09HL) não se verifica na superfície do oceano e do continente

temperatura superiores a 22°C em nenhuma das simulações (Figura 5.30 e Figura 5.31). Na circulação dos ventos é marcante a presença da brisa terrestre com ventos de norte e ventos associados à brisa de montanha nas regiões próximas a Serra da Cantareira (em torno da latitude de 23,5°S) e na Serra do Mar (em torno da latitude de 23,8°S). Adicionalmente, é observado os movimentos ascendentes na região entre as latitudes de 24,1° e 23,9°S devido à brisa de montanha, que em superfície ocasiona a confluência do vento, e, portanto, em movimento ascendente, como observado nas latitudes subsequentes de 24,1°S a 24,2°S. Esse comportamento do vento é considerado atípico para este período, uma vez que a noite e de madrugada, espera-se ventos descendentes das montanhas/serras (brisa de montanha). Essas correntes ascendentes observadas nesses horários podem estar associadas a um sistema de grande escala que predomina sobre a circulação local dos ventos como a brisa de montanha. Dessa forma, no dia 26 de setembro é interessante observar que a brisa de montanha não se configura na região da Serra do Mar. Entre as três parametrizações de área urbana não são observadas diferenças marcantes no padrão dos ventos e da temperatura.

A partir das 12HL (Figura 5.32) já se observa a mudança das brisas, a brisa marítima e a brisa de vale já estão configuradas e uma intensa corrente ascendente é observada na região da Serra do Mar. Essa intensificação do vento ocorre pela somatória da brisa de vale e a frente da brisa marítima. Na área urbana próxima a região de latitude 23,7°S observa-se uma corrente ascendente característica da brisa urbana e da ICU. Esse movimento vertical atinge níveis até 1100 metros de altura.

Na simulação com o esquema 2T (Figura 5.32c) , no horário das 12HL, a corrente ascendente da área urbana parece ser mais intensa, enquanto para o MORUSES (Figura 5.32e) os movimentos verticais são mais fracos, que é coerente, uma vez que o esquema 2T tem uma resposta de aquecimento superficial mais rápida que o MORUSES. Neste horário

ainda são observadas movimentos descendentes na Serra da Cantareira (latitude de 23,5°S).

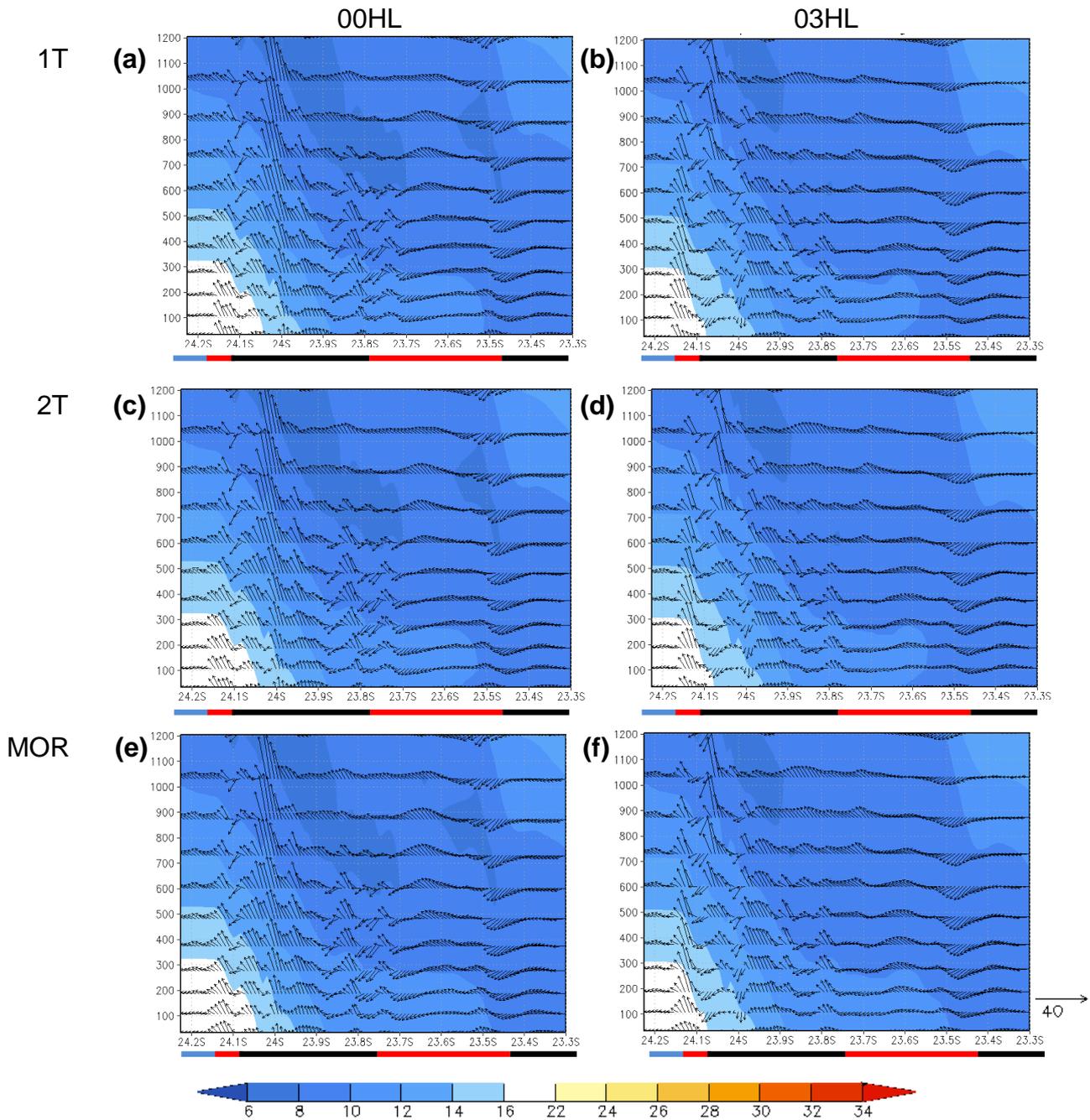


Figura 5.30 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

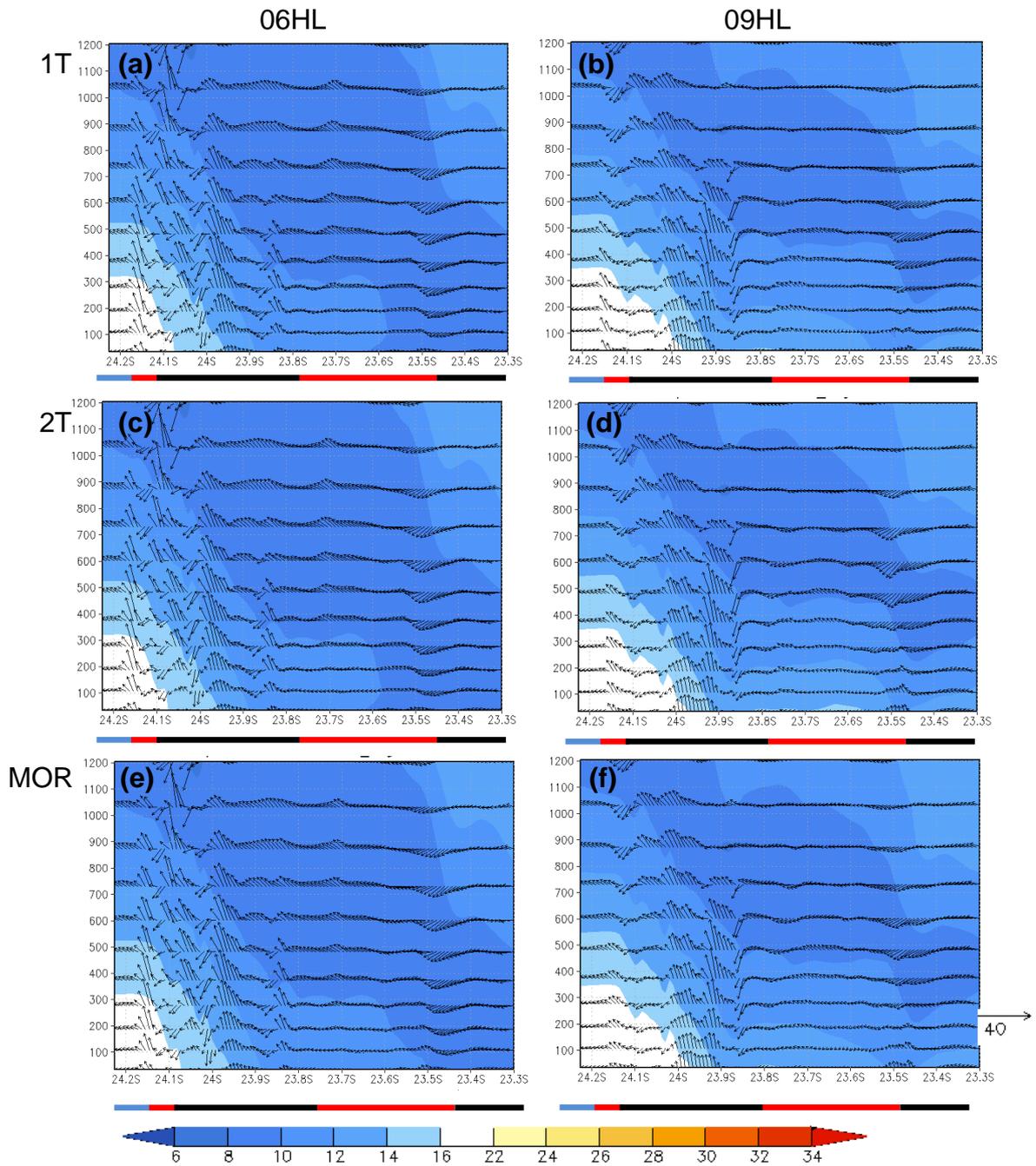


Figura 5.31 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

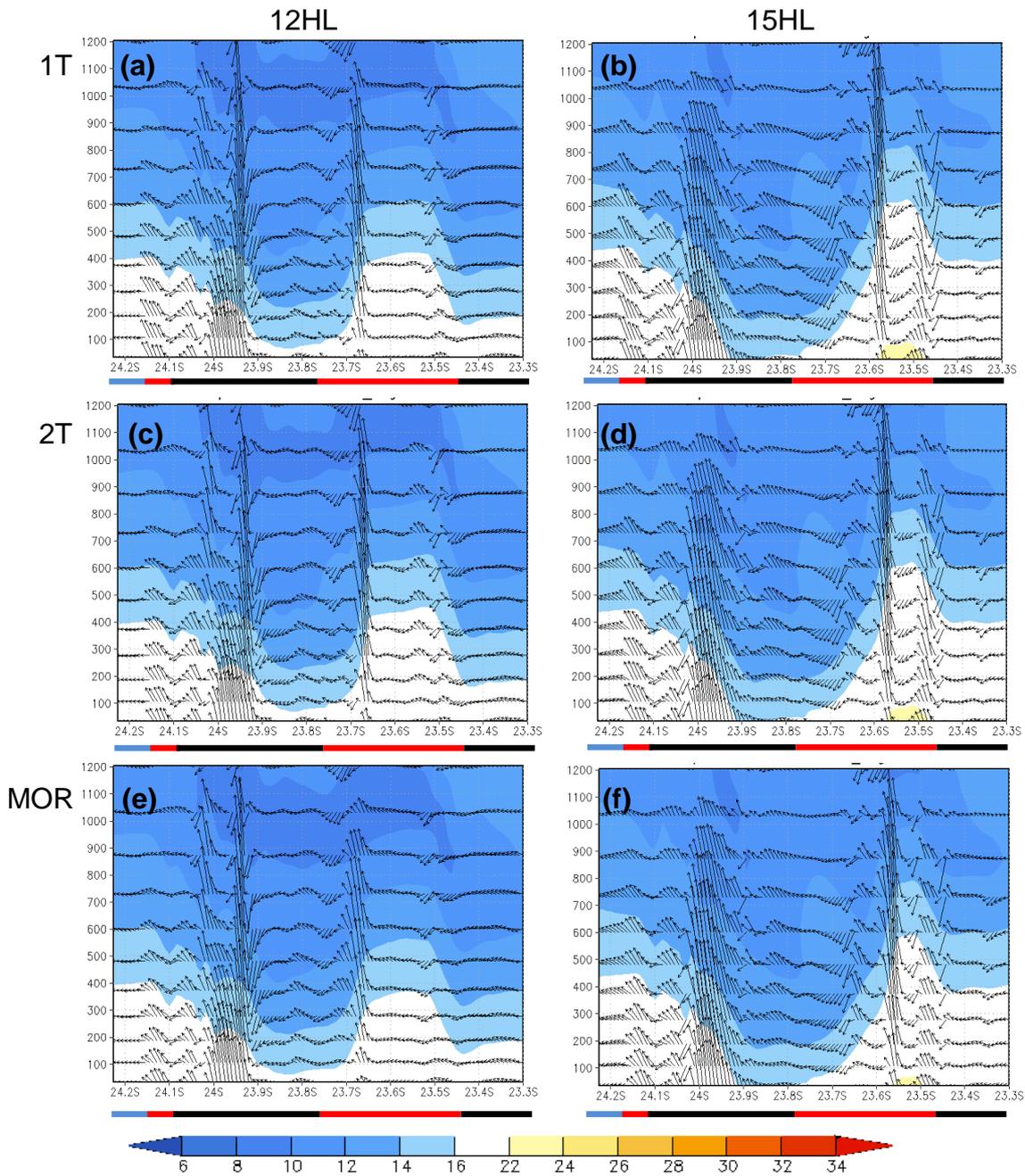


Figura 5.32 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

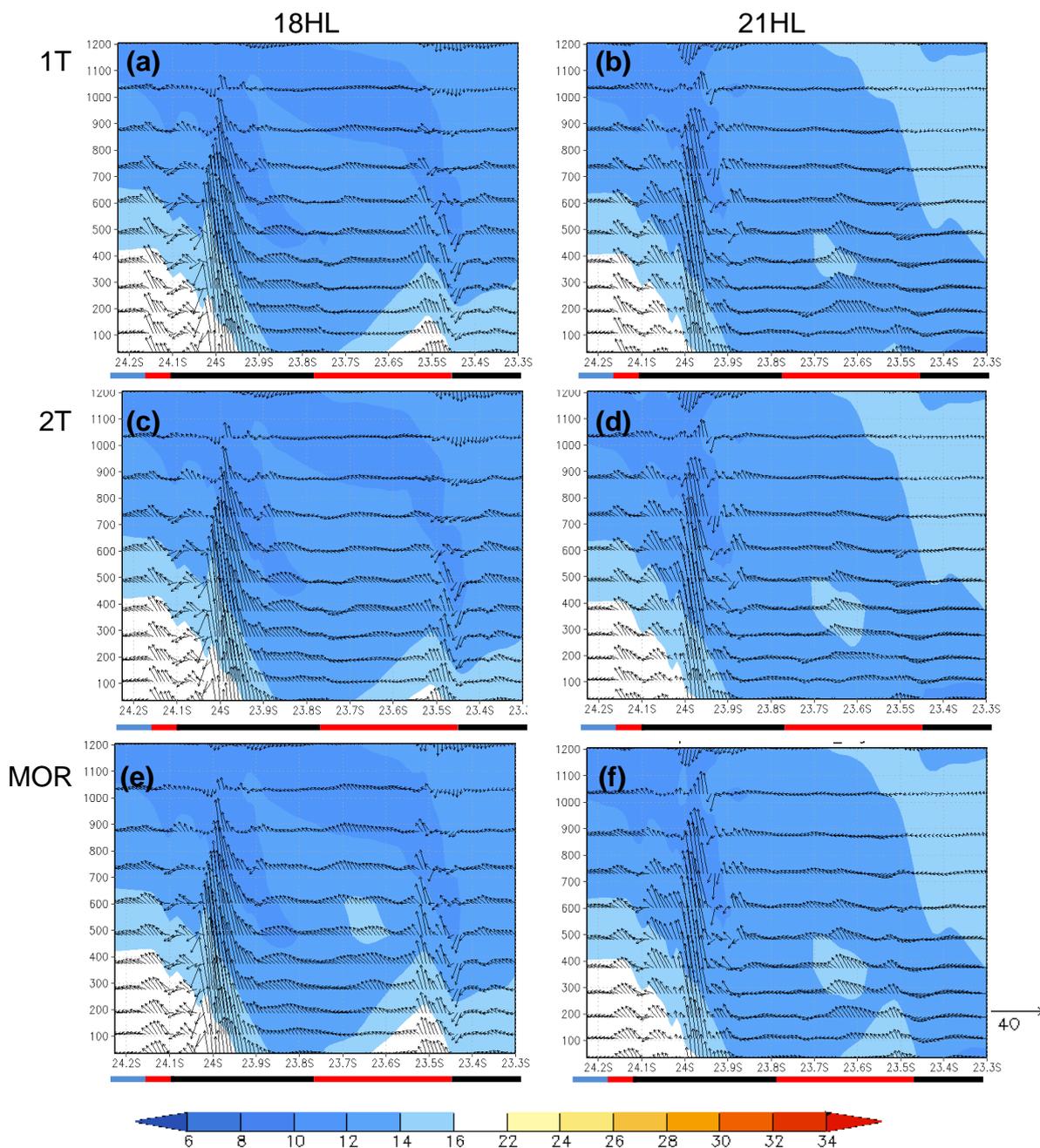


Figura 5.33 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 26 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha representa superfície não urbana.

Nos horários seguintes das 15HL a 21HL, não são observadas diferenças marcantes no padrão dos ventos e da temperatura entre as três parametrizações de área urbana. Por isso, são realizadas apenas a descrição das condições meteorológicas.

No horário da 15HL para o dia 26 de setembro não são observados os movimentos ascendentes no centro da área urbana (Figura 5.32). Esses movimentos são observados nas 3 horas antes (12HL, 13HL e 14HL, não mostrado aqui) No entanto, sobre a área urbana em torno da latitude de 23,6°S próximo a base da Serra da Cantareira, um bolsão de temperaturas mais quentes (22°C a 24°C) é observado nas três simulações. Esse movimento vertical está associado à brisa urbana e pela brisa de vale, tal comportamento, evidencia, portanto, um forte gradiente de temperatura horizontal e assim uma alta ICU. Destaca-se que os movimentos ascendentes sobre a região urbana em cerca de 23,6°S são mais intensos que no horário anterior atingindo uma extensão vertical de 1200 metros e associados a ele observa-se movimentos de retorno evidentes sobre a região urbana. As 15HL também se verificam que os ventos entre as latitudes 23,9°S a 24,1°S ainda permanecem intensos. Essa intensificação é alimentada pela brisa marítima e pela brisa de vale.

Às 18HL os movimentos ascendentes na região da Serra do Mar (latitude de 23,9°S a 24,0°S) já apontam um enfraquecimento, não atingindo alturas tão elevadas como nos horários anteriores, cerca de 900 metros (Figura 5.33). A circulação ascendente da ICU na área urbana em torno da latitude de 23,5°S também se enfraquece devido ao resfriamento da superfície e a mudança para a brisa de montanha. No horário das 00Z (Figura 5.33) já não se observa movimentos ascendentes na superfície da região urbana, mas ainda é observada a forte presença dos ventos ascendentes entre 23,9°S e 24°S. Na região da Serra da Cantareira se observa os ventos da brisa de montanha.

A Figura 5.34 a 5.37 mostra os perfis verticais de vento e temperatura para o dia 27 de setembro. Diferentemente ao observado no dia 26 de setembro, o regime de circulação dos ventos é mais calmo no período da madrugada e início da manhã (das 00HL as 09HL) e a presença bem estabelecida da brisa de montanha no dia 29 de setembro. Nos horários das 03HL e 06HL (Figura 5.34 e 5.35) é claramente observado ventos descendentes associados à brisa de montanha nas regiões da Serra do

Mar (em torno da latitude de 24.0S) e na Serra da Cantareira (em torno da latitude 23.5S). Uma diferença interessante observada no horário da 09HL (Figura 5.35) é a mudança do regime de brisa. Observa-se próximo a superfície entre 24,0°S e 23,9°S uma corrente ascendente associada a entrada da brisa de vale. Esse mesmo comportamento é encontrado próximo à superfície na Serra da Cantareira, onde uma fraca corrente ascendente começa a se estabelecer entre 23,4°S e 23,5°S. Com relação à distribuição de temperatura, sobre o oceano e parte do continente observam-se núcleos de temperaturas inferiores a 22°C. Durante esse período não há diferenças significativas entre as simulações.

As 12HL destaca-se a elevação da temperatura na superfície do oceano e do continente ocasionando a intensificação do respectivo gradiente horizontal (Figura 5.36). Sendo a região entre 24°S e 23,9°S e a região entre 23,4°S a 23,5°S com temperaturas mais elevadas (24°C a 26°C) para todas as simulações, no entanto, esse aquecimento é mais intenso (26°C a 28°C) e mais profundo (altura de até 500m) na simulação com o esquema 2T (Figura 5.36c). Com relação ao campo de vento observa-se um escoamento sobre o oceano em direção ao continente caracterizando a frente da brisa marítima e um forte corrente ascendente na divisa entre o mar/continente marcando a frente da brisa marítima (24,1°S e 24,2°S). Ao mesmo tempo, observa-se na base da Serra da Cantareira (23,5°S e 23,4°S) a subida dos ventos correspondente à brisa de vale.

No horário das 12HL, apenas a simulação com o 2T (Figura 5.36c) apresenta mais claramente na área urbana a corrente ascendente da brisa urbana, o esquema 1T (Figura 5.36a) mostra uma circulação inicial fraca, enquanto o MORUSES (Figura 5.36e) mostra uma calmaria e estagnação do vento sobre essa região. A corrente ascendente associada à circulação da brisa urbana é evidenciada nos três horários subsequentes das 12HL, 13HL e 14HL (não apresentado aqui). Essa circulação urbana se mostra com maior profundidade vertical na simulação 1T e 2T, cuja altura da corrente ascendente chega a 1200m

enquanto para as simulações com MORUSES os movimentos verticais atingem no máximo 700m.

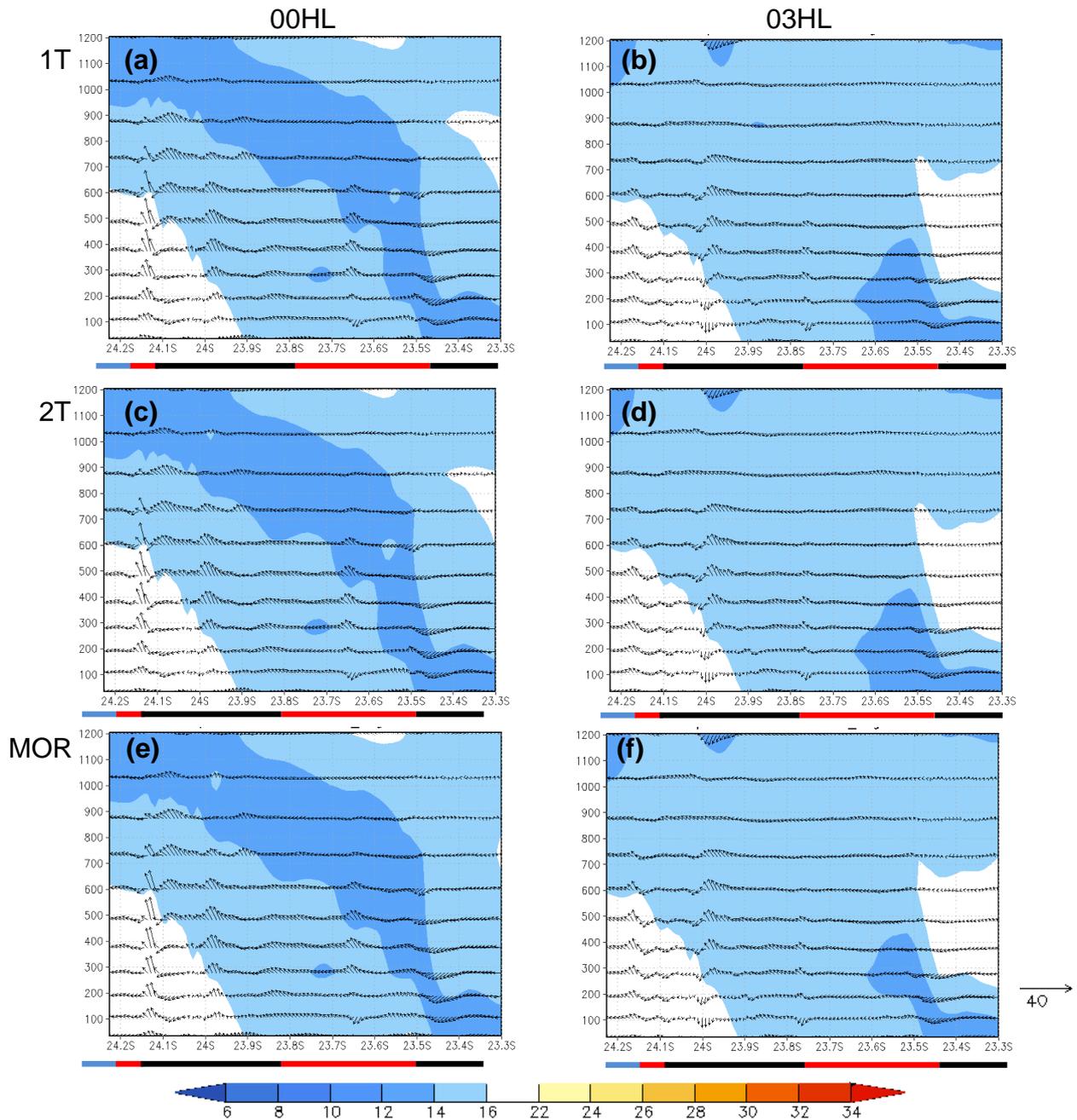


Figura 5.34 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 00HL e 03HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

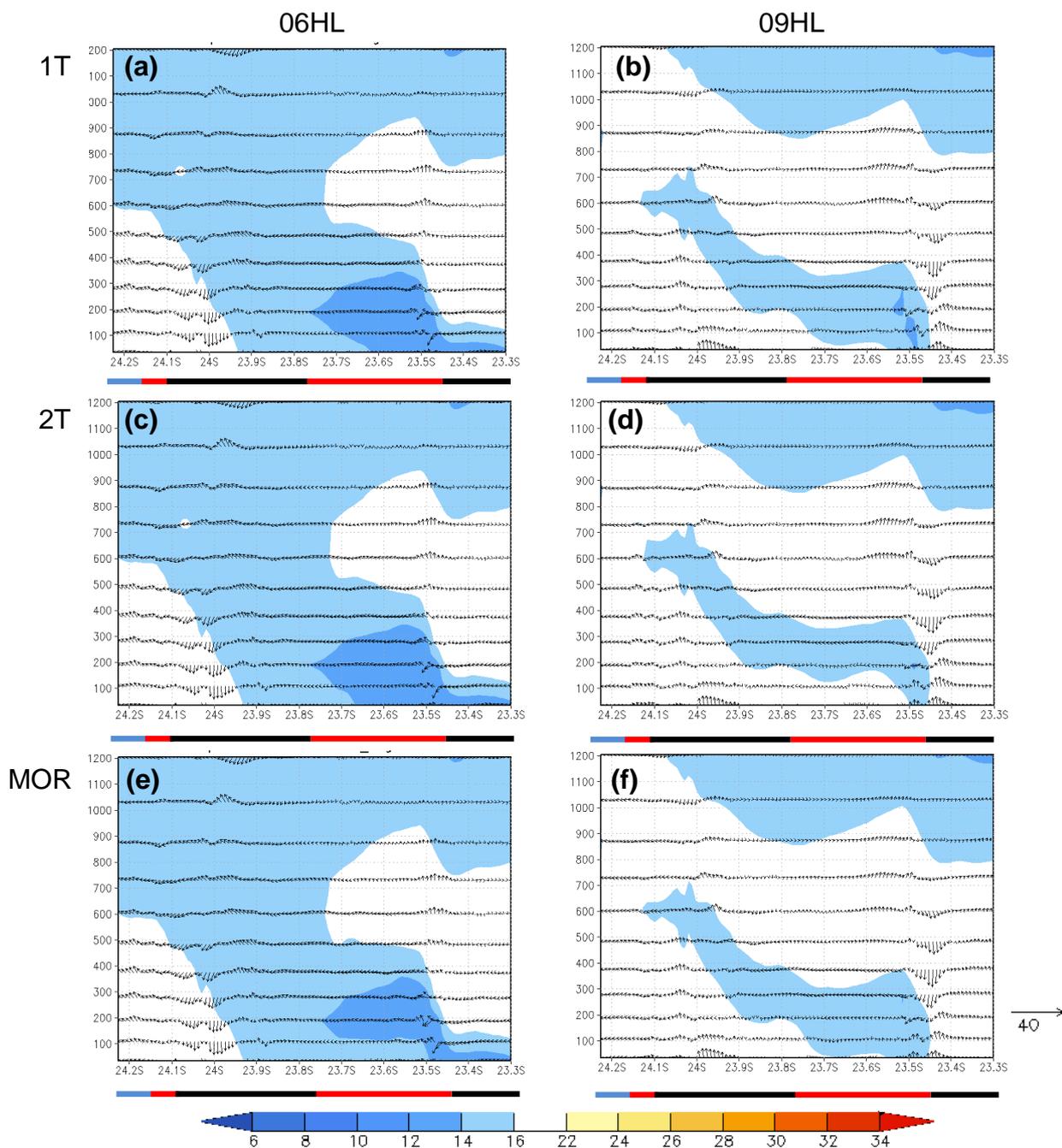


Figura 5.35 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 06HL e 09HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

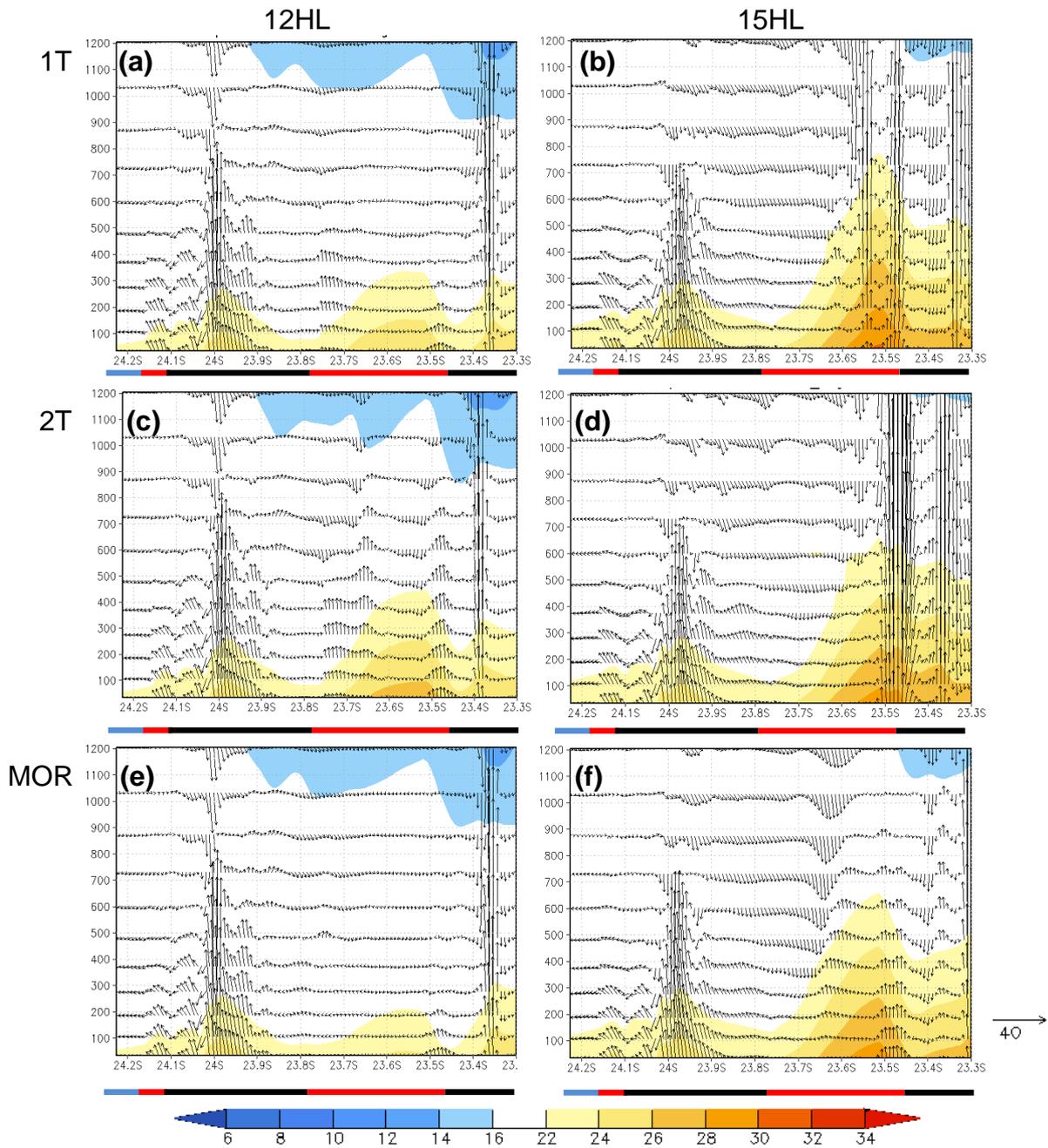


Figura 5.36 - Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 12HL e 15HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha preta representa superfície não urbana.

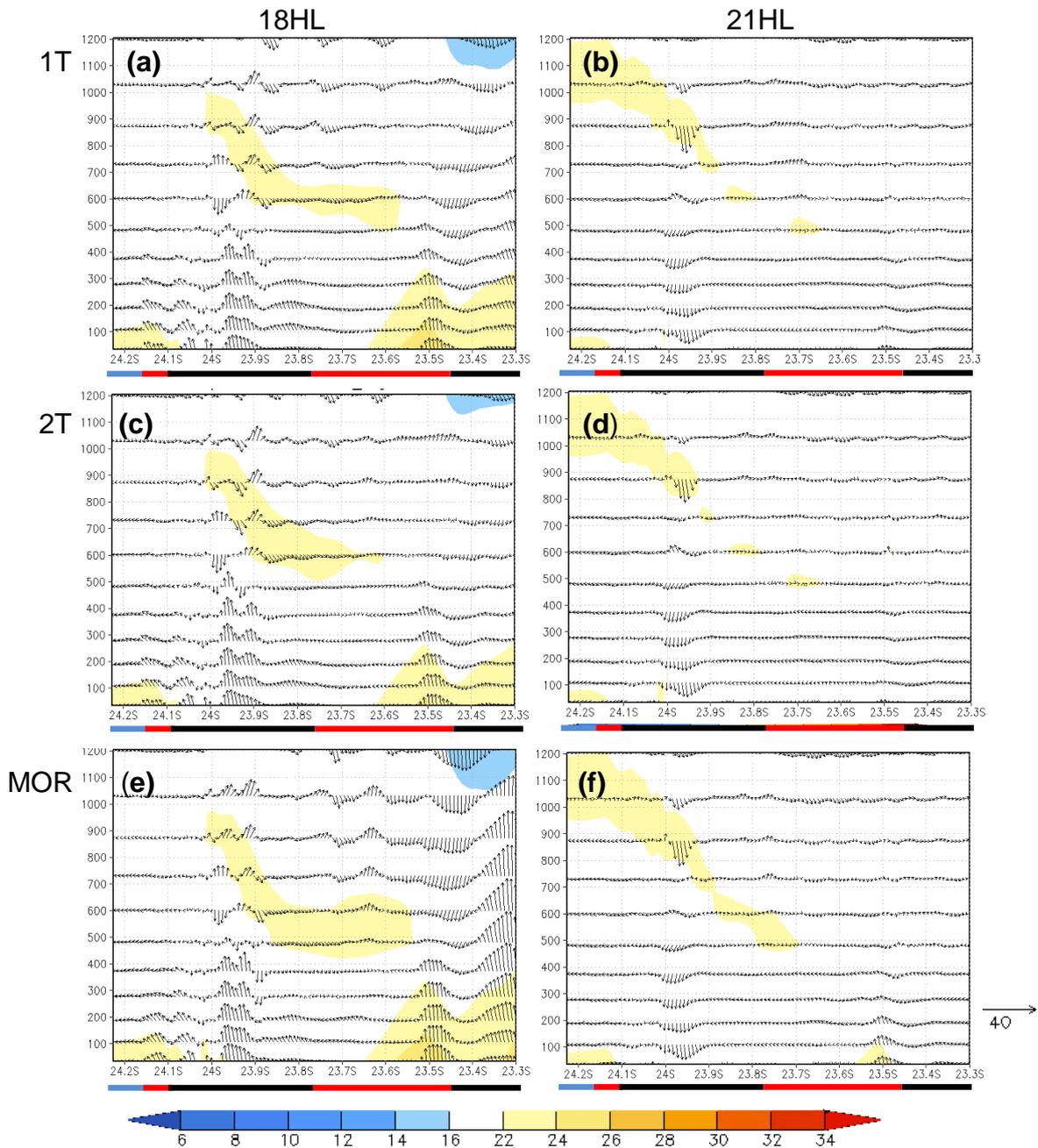


Figura 5.37 – Distribuição vertical da temperatura e vento na RMSP no dia 29 de setembro de 2011 as 18HL e 21HL para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f). A linha embaixo da figura delimita o tipo de superfície: linha azul é a região oceânica, linha vermelha é a área urbana e linha representa superfície não urbana.

No horário das 15HL (Figura 5.36) o centro da área urbana da RMSP (entre latitude de 23,8°S a 23,5°S) já não apresenta temperaturas tão elevadas quanto às regiões de serra (entre 24°S e 23,9°S e 23,5°S e 23,4°S). O mesmo ocorre com a circulação, os ventos de brisa urbana já

não são evidentes neste horário, as simulações que mostram essa brisa de forma muito fraca são as com o esquema 1T (Figura 5.36b) e o MORUSES (Figura 5.36f), a simulação com o esquema 2T (Figura 5.36d) já apresenta a calmaria dos ventos. No entanto, para as regiões da Serra da Cantareira e da Serra do Mar a circulação tipicamente ascendente da brisa de vale é bem intensa, atingindo uma profundidade vertical bem marcante para a região da Serra do mar a corrente ascendente chega até 700m de altura enquanto para a Serra da Cantareira essa correntes atingem até 1200 m sendo observado somente nas simulações com o esquema 1T e 2T.

As 18HL (Figura 5.37) as temperaturas permanecem elevadas nas regiões serranas e na região marítima, com a presença associada dos ventos ascendentes porém enfraquecidos.

Durante a noite 21HL (Figura 5.37) se observa a desintensificação das temperaturas na área marítima e continental. A circulação dos ventos começa a altera-se para o regime de ventos típico da brisa terrestre e da brisa de montanha (latitude de 24,1°S e latitude de 23,5°S), que passa a predominar na RMSP.

Nos horários das 18HL a 21HL não são observadas diferenças significativas entre as simulações com os esquemas urbanos.

Os resultados da análise do perfil vertical para o dia representativo do primeiro caso de estudo (26 de setembro) mostram que a circulação dos ventos foi intensa e sobre um regime de ventos bem marcante, possivelmente conduzido por um sistema de alta pressão que predominou sobre as circulações locais como a brisa de montanha que não ocorreu na região da Serra do Mar (entre 24°S e 23,9°S). Por outro lado, nesse dia foi possível identificar no horário das 12HL a circulação vertical da brisa urbana nas simulações com as três parametrizações. No campo de temperatura é verificado que essa circulação de ventos mais intensos na RMSP acarretou na não intensificação das temperaturas sobre a área marítima e continental e assim num gradiente de temperatura intenso.

Para o dia 29 de setembro, a circulação dos ventos é mais fraca em todo o período de análise sem nenhum regime de grande escala que predomine ventos mais intensos, possibilitando a clara atuação das circulações locais, por isso é possível observar os ventos típicos da brisa do vale e montanha nas regiões de serra. No entanto, como os ventos são mais calmos há uma maior elevação da temperatura em toda a superfície, o que diminui o gradiente de temperatura e acarreta com que não seja possível identificar claramente a circulação da brisa urbana na área urbana da RMSP. Em resumo, a análise do perfil vertical da temperatura e vento para os dois dias demonstram os diferentes padrões e regimes de brisa que influenciam na intensificação e desintensificação da ICU.

Na segunda análise é mostrada a evolução temporal do perfil vertical de temperatura e vento para pontos representativos da RMSP. Os dois pontos de análise escolhidos são as estações usadas para determinar a ICU, portanto, a estação de São Caetano do Sul e a estação de Parelheiros. Dessa forma, será possível avaliar o perfil de temperatura e vento dentro e fora da área urbana. A Figura 5.41 ilustra a evolução temporal do perfil vertical em São Caetano do Sul e em Parelheiros para as simulações com o esquema 1T, 2T e MORUSES.

Na estação de São Caetano do Sul (Figura 5.38 (a) (c) (e)) é observado que nos três primeiros dias da análise (26, 27 e 29) a temperatura é inferior a 22°C em todo o perfil vertical, para os dias subsequentes o aumento da temperatura para 22°C a 28°C e chegando até 32°C no dia 30. Esse comportamento é observado em todas as simulações. Contudo, o padrão de vento muda substancialmente de uma simulação para outra. A simulação com o esquema 2T (Figura 5.38c) reproduz satisfatoriamente as correntes ascendentes típica da região urbana típica (brisa urbana) em praticamente todos os dias, no entanto, esses movimentos verticais são mais evidentes nos dia 29 e 30 de setembro. Nas simulações com o esquema 1T (Figura 5.38a) e MORUSES (Figura 5.38e), é observado um

fraco indicativo dessa circulação nos dias 26 a 28, sendo melhor representado apenas nos dias 29 e 30 de setembro.

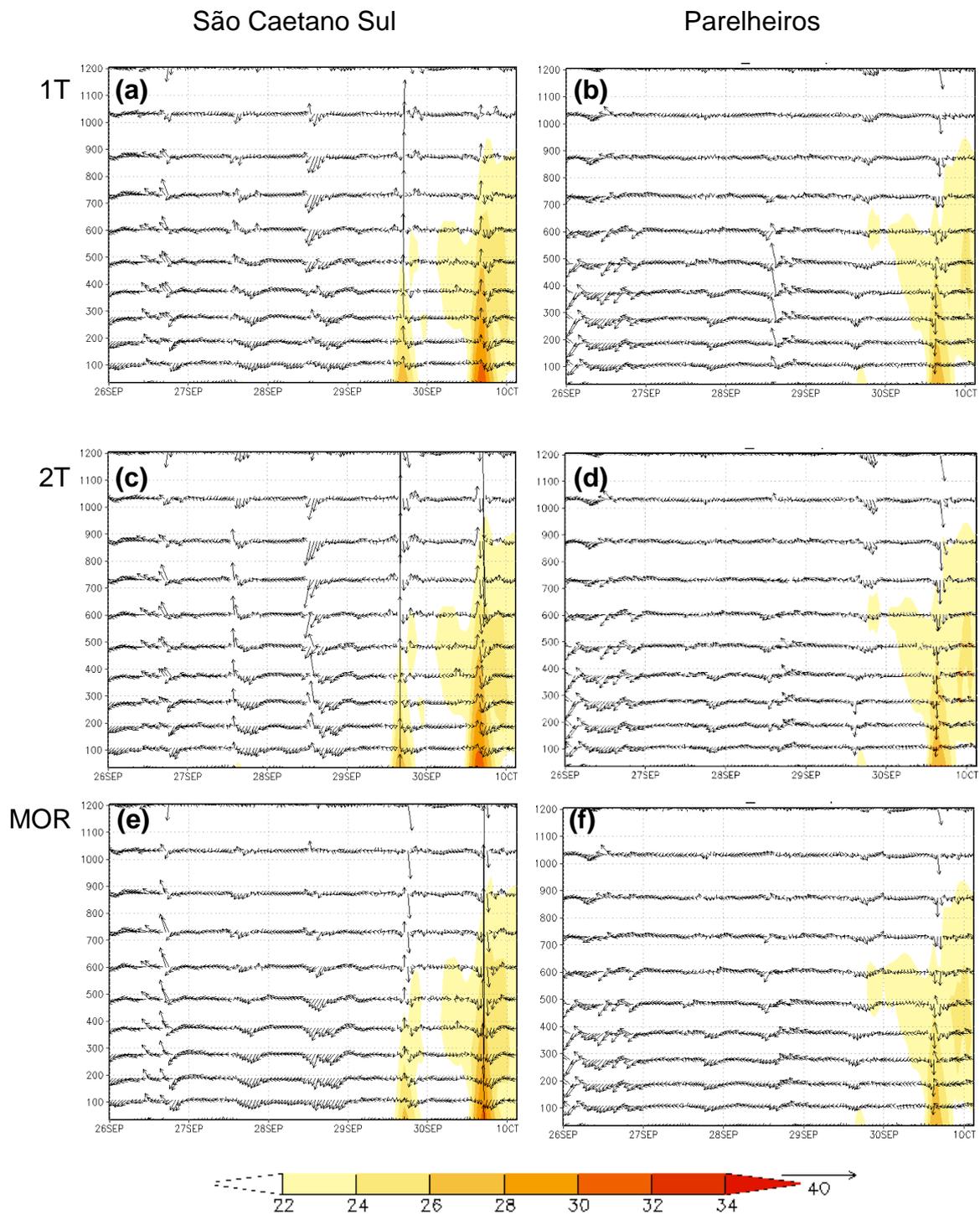


Figura 5.38 – Evolução temporal do perfil vertical de temperatura e vento para o esquema 1T (a) e (b), esquema 2T (c) e (d) e MORUSES (e) e (f).

Para a estação de Parelheiros (Figura 5.38 (b), (d) e (f)) por não estar localizada na área urbana, as parametrizações não atuam de forma direta

e, portanto não há diferenças significativas entre as simulações. É observado temperaturas menores que 24°C nos dias 26 a 29 de setembro, e apenas no dia 30 são evidenciadas temperaturas elevadas de cerca de 30°C sobre a região. Com relação aos ventos, verifica-se o predomínio de ventos fracos com períodos de calmaria, exceto nos dias 29 e 30 em que são observados correntes descendentes.

Com os resultados dessa seção foi possível concluir que as parametrizações urbanas implementadas na nova versão do BRAMS 5.0 reproduzem satisfatoriamente a ilha de calor urbana.

No que se trata da validação das simulações foi evidenciado que os três esquemas urbanos apresentam consistência com as observações. Os resultados subsequentes, como a avaliação temporal, espacial e vertical do campo de temperatura mostraram a eficiência das parametrizações na representação do aquecimento e resfriamento urbano, bem como o aprisionamento do calor devido à configuração de cânion da área urbana. Do mesmo modo, o campo de vento da RMSP nos esquemas urbanos também apresentaram resultados satisfatórios como, por exemplo, a representação da brisa urbana (circulação típica do fenômeno da ICU) e as circulações locais de brisa.

Em suma, dentre os resultados discutidos, concluiu-se que os esquemas com a configuração de duas camadas (telhado e cânion) demonstraram-se melhores e mais apropriados na representação dos fenômenos da escala da área urbana.

5.4.2. Interação da ICU e poluentes atmosféricos: modelagem numérica

Nesta segunda parte dos resultados do modelo BRAMS são avaliadas as relações existentes entre a ilha de calor e os poluentes na RMSP. Para tal, é apresentada uma análise que evidencia os efeitos combinados da ICU e da distribuição/comportamento dos poluentes em diferentes aspectos.

A análise dos resultados da seção 5.4.1 indicou que as simulações numéricas com parametrizações urbanas utilizando o esquema de duas camadas (2T e MORUSES) melhor caracterizam a área urbana na RMSP. Desta forma, nesta seção adotou-se apenas a simulação com o esquema 2T, embora o MORUSES também apresente bons resultados na área urbana.

Uma comparação entre as simulações numéricas e as observações é apresentada no Apêndice C. Esta seção enfoca a análise das interações entre a IICU e os poluentes com base nos resultados das simulações numéricas com o BRAMS. O período de estudo permanece o mesmo que adotado na seção 5.4.1, dia 26 a 30 de setembro de 2011, com dois casos de estudo, o primeiro compreende os dias 26 e 27, sendo o dia 26 representativo do primeiro caso, enquanto o segundo corresponde aos dias 29 e 30, sendo o dia 29 associado ao segundo caso de estudo.

5.4.2.1. Evolução temporal

Na primeira análise da interação da ICU e dos poluentes pela simulação numérica foram realizadas comparações da evolução temporal. Essa metodologia foi baseada no estudo de Freitas (2003), e tem como objetivo comparar variáveis com unidades diferentes. Assim, os valores de IICU e dos poluentes são normalizados. A normalização das variáveis foi feita de acordo com a equação (5.17):

$$Var\ normalizada = \frac{var - \min(var)}{\max(var) - \min(var)} \quad (5.17)$$

A série temporal dos valores normalizados da IICU e do CO estimados pelas simulações numéricas é apresentada na Figura 5.39. Uma relação positiva entre os valores de ICU e a concentração de CO é encontrada no comportamento temporal. Esse comportamento concorda com a análise dos dados observados apresentados pelos gráficos de distribuição da seção 4.4.1, onde foram encontrados altos valores da concentração de CO para IICU elevadas na primavera de 2010 e 2011. Nos resultados das simulações numéricas, destacam-se os dias 29 e 30 de setembro, em que

são evidenciados dois picos de concentração de CO, um no início da manhã (antes das 12HL) e outro no fim da tarde/início da noite (antes das 00HL). Nesses dias a IICU é mais intensa (valores normalizados da IICU são aproximadamente iguais a 1). Nos dias anteriores, 26 a 28 são verificados no segundo pico de máxima, baixas concentrações de CO (valores de até 0,30) associados aos valores de IICU (valores de até 0,85) que também são mais baixos. Esse comportamento encontrado na evolução temporal evidencia que dias de IICU mais intensas coincidem com valores mais altos da concentração de CO.

Na análise da evolução temporal dos valores normalizados do NO_x e da IICU (Figuras 5.40) um comportamento similar ao CO é encontrado (Figura 5.39). Nos dias 26 a 28 de setembro, os valores do NO_x no primeiro pico são praticamente iguais aos valores do dia 29 e 30, no entanto, o segundo pico da concentração é significativamente diferente. No dia 26 a 28, os valores do segundo pico de NO_x não ultrapassam 0,4, enquanto para o dia 29 e 30 quase atingem 1. Portanto, a concentração do NO_x também está relacionada à intensidade da ICU. Em dias com IICU maiores são encontradas concentrações de NO_x mais altas, assim como são observados um comportamento diurno com a presença de dois picos de máxima concentração bem definidos.

Na evolução temporal dos valores normalizados de O₃ e da IICU (Figura 5.41) é evidenciado uma nítida relação de fase positiva dos máximos de O₃ com os máximos de IICU, de tal modo que, quando a IICU atinge seu máximo também são observados máximos valores de O₃. Portanto, para o O₃ e a IICU são encontradas interações positivas em fase, na qual máximas concentrações de O₃ coincidem com a máxima IICU. No entanto, vale ressaltar que apesar das máximas coincidirem no mesmo horário, não necessariamente quando houver à máxima IICU ocorrerá à máxima concentração de O₃, uma vez que outros fatores influenciam na ocorrência dos máximos tanto da ICU como na concentração do O₃.

Além disso, ao observar a evolução temporal da Figura 5.41, é verificado que nos dias 29 e 30, os valores de IICU e O₃ são mais altos (da ordem

de 1) ao comparados aos outros dias, apontando, que em ICU mais intensas os valores de concentração de O_3 também são mais altos.

De maneira geral, na análise da evolução temporal dos poluentes e da ICU pela simulação numérica são encontrados dois aspectos importantes: o primeiro assinala que existe uma relação de fase positiva entre a máxima concentração do O_3 e a máxima intensidade da ilha de calor, no segundo aspecto é observado que há uma relação positiva entre ICU mais intensas e o aumento da concentração dos poluentes (como foi verificado no CO , NO_x e O_3), de modo que, dias com altos valores de ICU coincidem com altas concentrações dos poluentes.

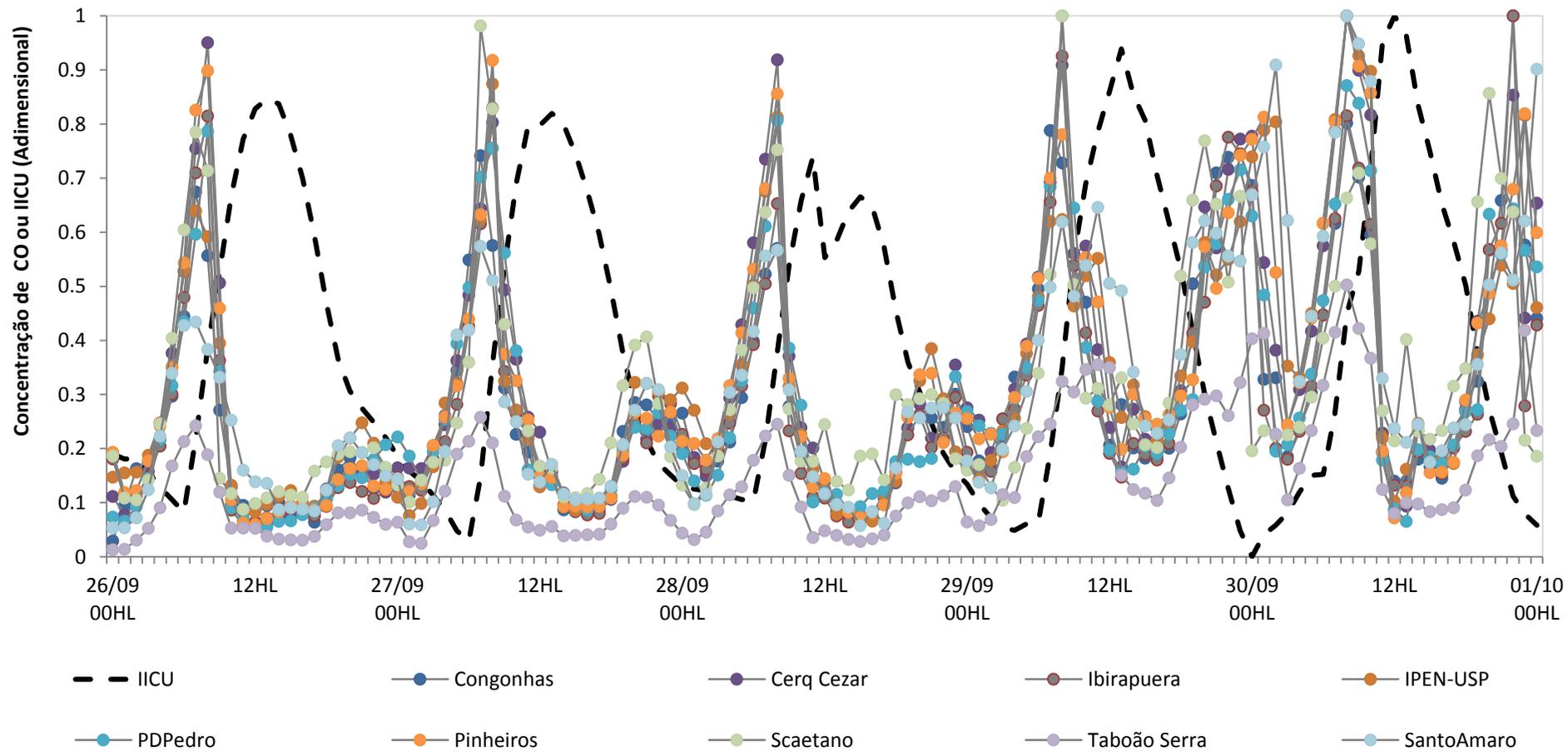


Figura 5.39 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do CO e da ICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.

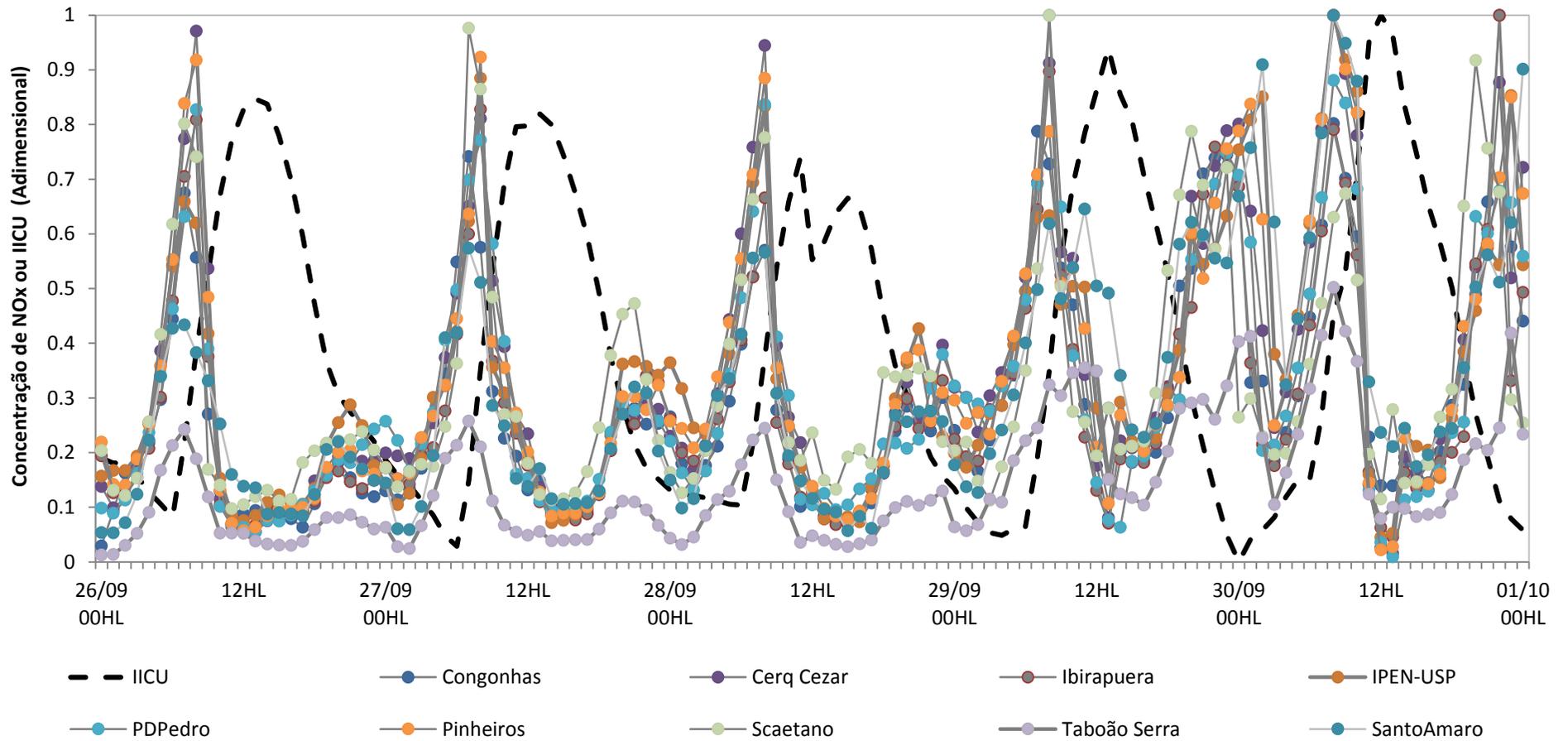


Figura 5.40 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do NO_x e da IICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.

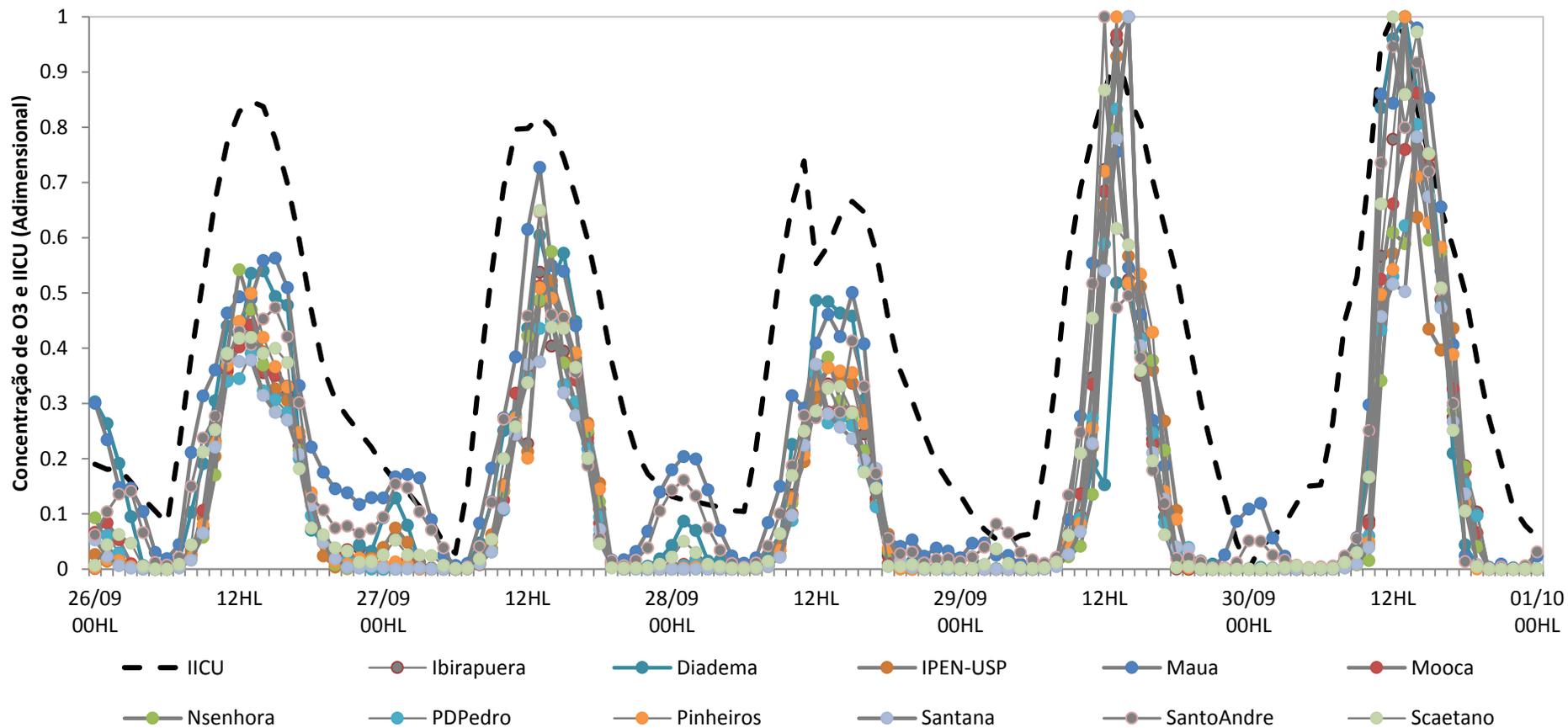


Figura 5.41 - Evolução temporal dos valores normalizados da concentração do O₃ e da IICU estimadas pela simulação numérica no período de 26 a 30 de setembro de 2011.

5.4.2.2. Padrão espacial

Nesta seção são analisadas a distribuição espacial dos poluentes atmosféricos na RMSP avaliando a sua concentração associada tanto à ocorrência da ICU como as circulações locais. O comportamento espacial do CO, NO_x e do O₃ são apresentados para os dias representativos aos casos de estudo, dia 26 e dia 29.

A distribuição espacial do CO é apresentada nas Figuras 5.42 e 5.43 para o dia 26 e as Figuras 5.44 e 5.45 para o dia 29 de setembro.

Para o dia 26 de setembro, as 00HL e 03HL (Figura 5.42 (a) e (b)), o padrão espacial de CO apresenta valores de 0,25ppm a 0,75ppm com núcleos de até 1ppm, e com a presença da brisa terrestre que predomina sobre toda a RMSP com ventos de Sudeste e Leste, é observado o transporte do CO para áreas a Noroeste da RMSP.

Os horários das 06HL e 09HL (Figura 5.42 (c) e (d)), correspondem as maiores concentração de CO na RMSP em decorrência da grande quantidade de veículos (*"horário do rush"*). A brisa terrestre ainda está bem configurada, conduzindo o poluente para dentro do interior da RMSP.

Nos horários seguintes de 12HL e 15HL (Figura 5.43 (a) e (b)), a brisa marítima avança sobre toda a RMSP com ventos de Sudeste, reduzindo a concentração do CO na área urbana. Os horários subsequentes, 18HL e 21HL (Figura 5.43 (c) e (d)), a concentração de CO volta a aumentar devido ao intenso tráfego de veículos na RMSP, porém com a presença da brisa marítima a concentração do CO é mais alta nas bordas da área urbana da RMSP.

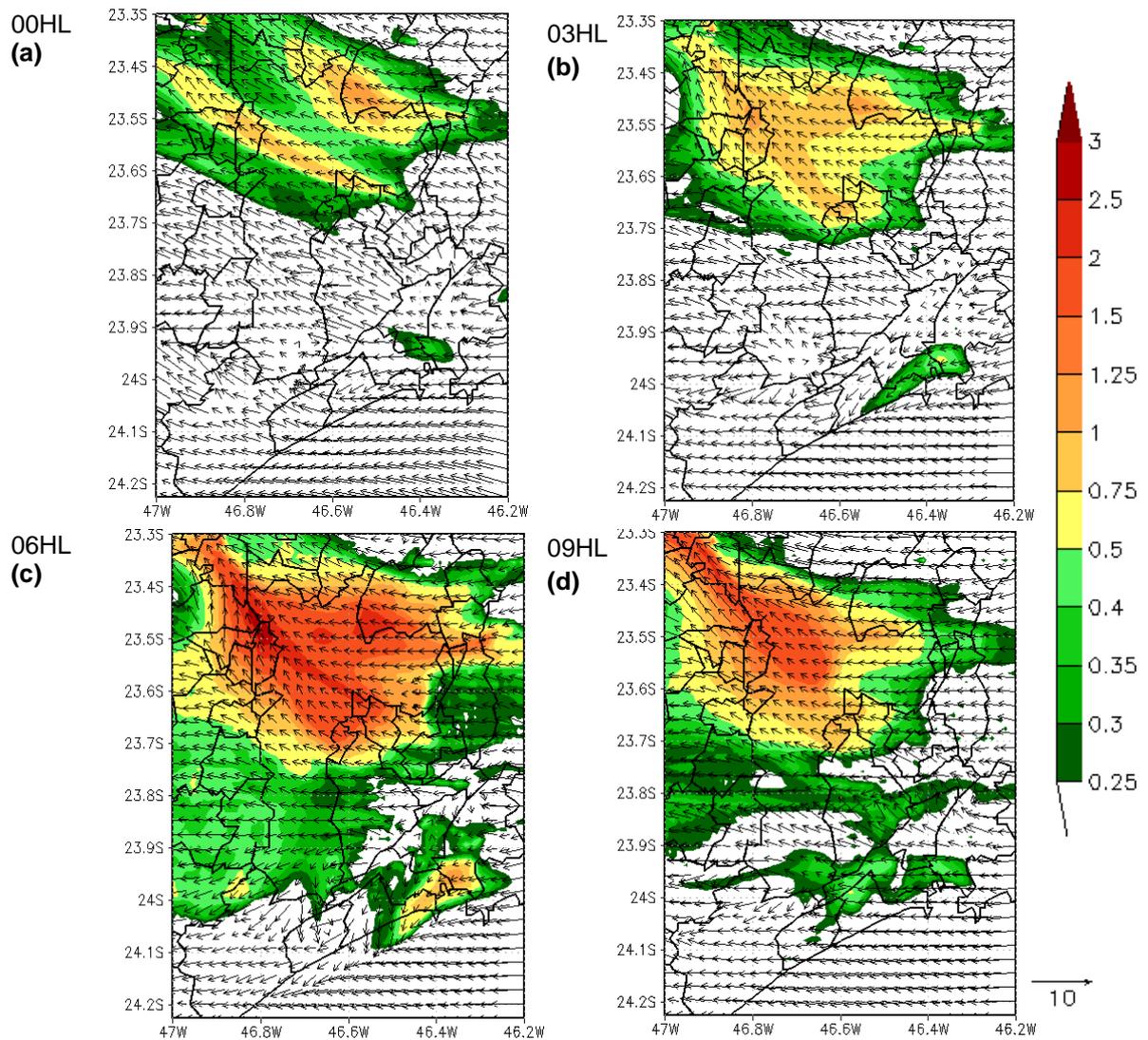


Figura 5.42 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

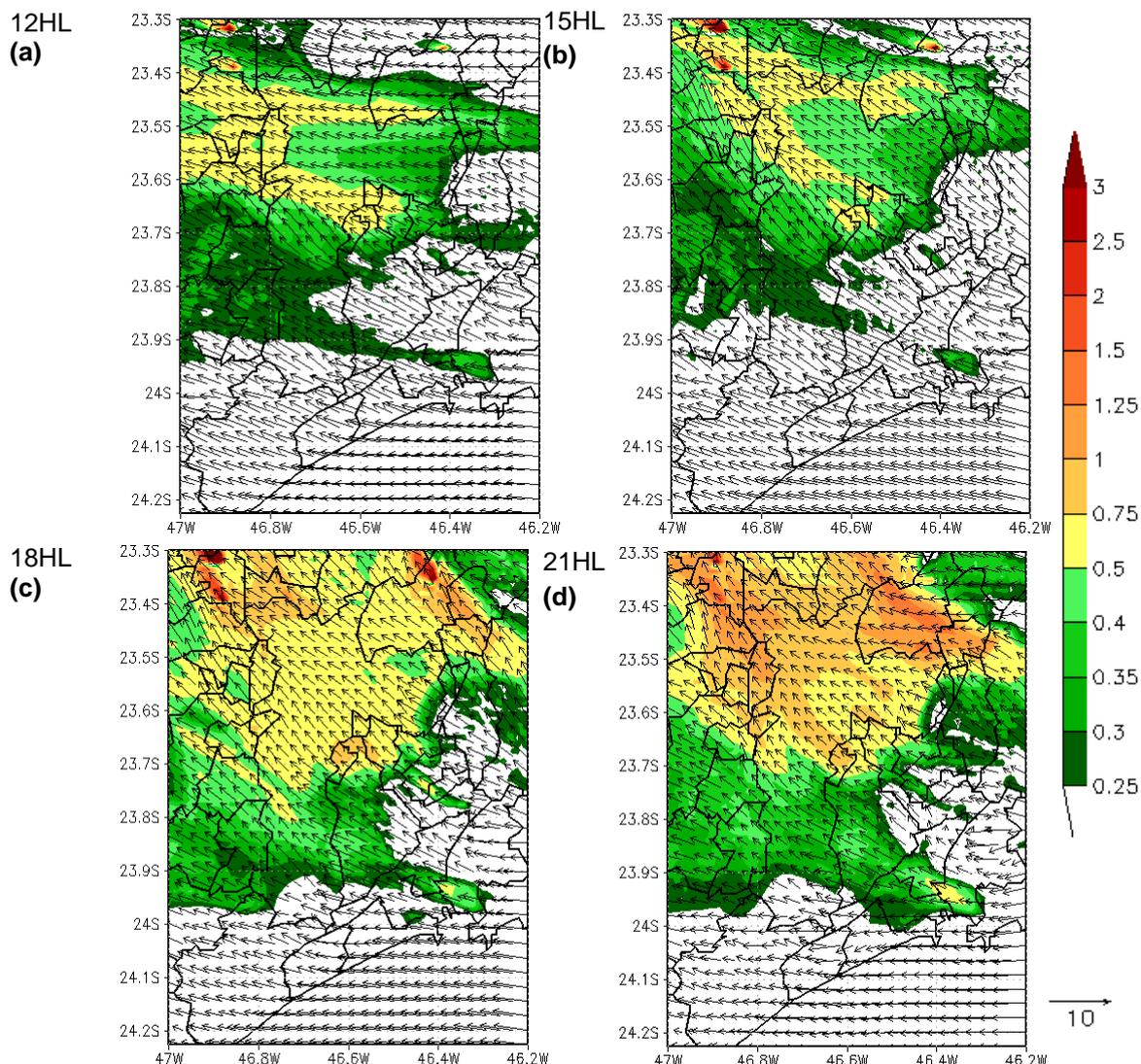


Figura 5.43 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

Para o dia 29 de setembro, nos horários da madrugada, 00HL e 03HL (Figura 5.44 (a) e (b)), são observados na área urbana da RMSP concentrações de CO de cerca de 0,25ppm a 0,5ppm, porém com núcleos de 0,75ppm a 1ppm e uma circulação predominantemente de Leste e Sudeste associada a brisa terrestre. Assim, a pluma de CO é carregada para regiões mais distantes da área urbana (regiões a Noroeste da RMSP).

Os horários de 06HL e 09HL, Figura 5.44 (c) e (d), correspondem aos horários de máxima concentração de CO (valores de 1,5ppm a 2,5ppm) em decorrência ao “horário de rush”. A brisa terrestre ainda está bem

configurada, transportando os poluentes para áreas ao Norte/Noroeste da RMSP. As 9HL (Figura 5.44 (d)) a mudança da circulação de brisa já é observada com a presença da estagnação/calmaria dos ventos na área urbana da RMSP.

No horário de 12HL, Figura 5.45 (a), a brisa marítima já adentra a RMSP, porém não ultrapassa a latitude de 23,6°S. As 15HL (Figura 5.45 (b)), com a brisa marítima predominando sobre toda a RMSP, observa-se que os valores de CO diminuem-se. Além disso, uma confluência dos ventos é observada em aproximadamente 23,5°S.

No horário das 18HL (Figura 5.45 (c)), a brisa já avança sobre a RMSP carregando consigo uma quantidade de CO para dentro do continente. No horário de 21HL (Figura 5.45 (d)), com a desintensificação da brisa marítima e o aumento da circulação dos veículos, os valores de CO voltam a aumentar na área urbana da RMSP, da ordem de 1,25ppm a 2,5ppm.

Analisando a distribuição espacial de CO na RMSP nos dois dias de análise é observado que as maiores concentrações correspondem aos horários com intenso tráfego de veículos na RMSP (entre as 06HL e 09HL e entre as 18HL e 21HL), horários os quais a IICU não atinge sua máxima intensidade (entre as 12HL e 15HL). Em ambos os dias, é verificado entre as 12HL e 15HL, que a concentração do CO sobre a área urbana não é intensa em virtude da entrada da brisa marítima, que a medida que avança sobre a RMSP transposta o CO para regiões a Norte e Noroeste. No entanto, é observado que para o dia 29 de setembro, a concentração do CO sobre a área urbana da RMSP apresenta maiores valores e um padrão espacial maior em relação ao dia 26. Esse comportamento está relacionado à ICU, como no dia 29 o padrão de aquecimento da RMSP é mais intenso, a IICU e a circulação associada a ela (brisa urbana) estão bem configuradas do que em relação ao dia 26. Isso ocasiona um atraso na entrada da brisa marítima na RMSP, e, portanto, a concentração do CO tende a ser mais alta no dia com ilha de calor mais intensa.

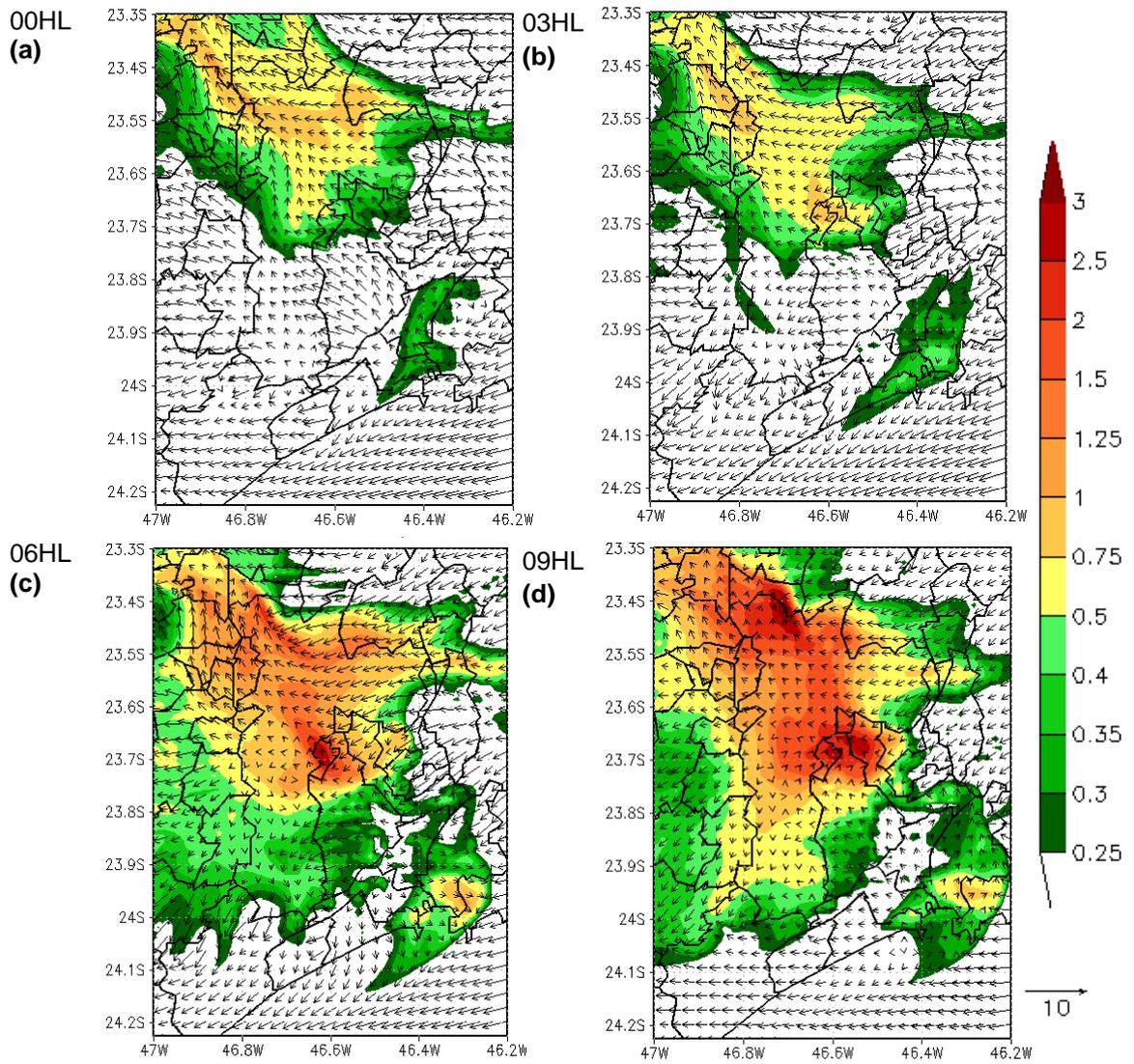


Figura 5.44 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

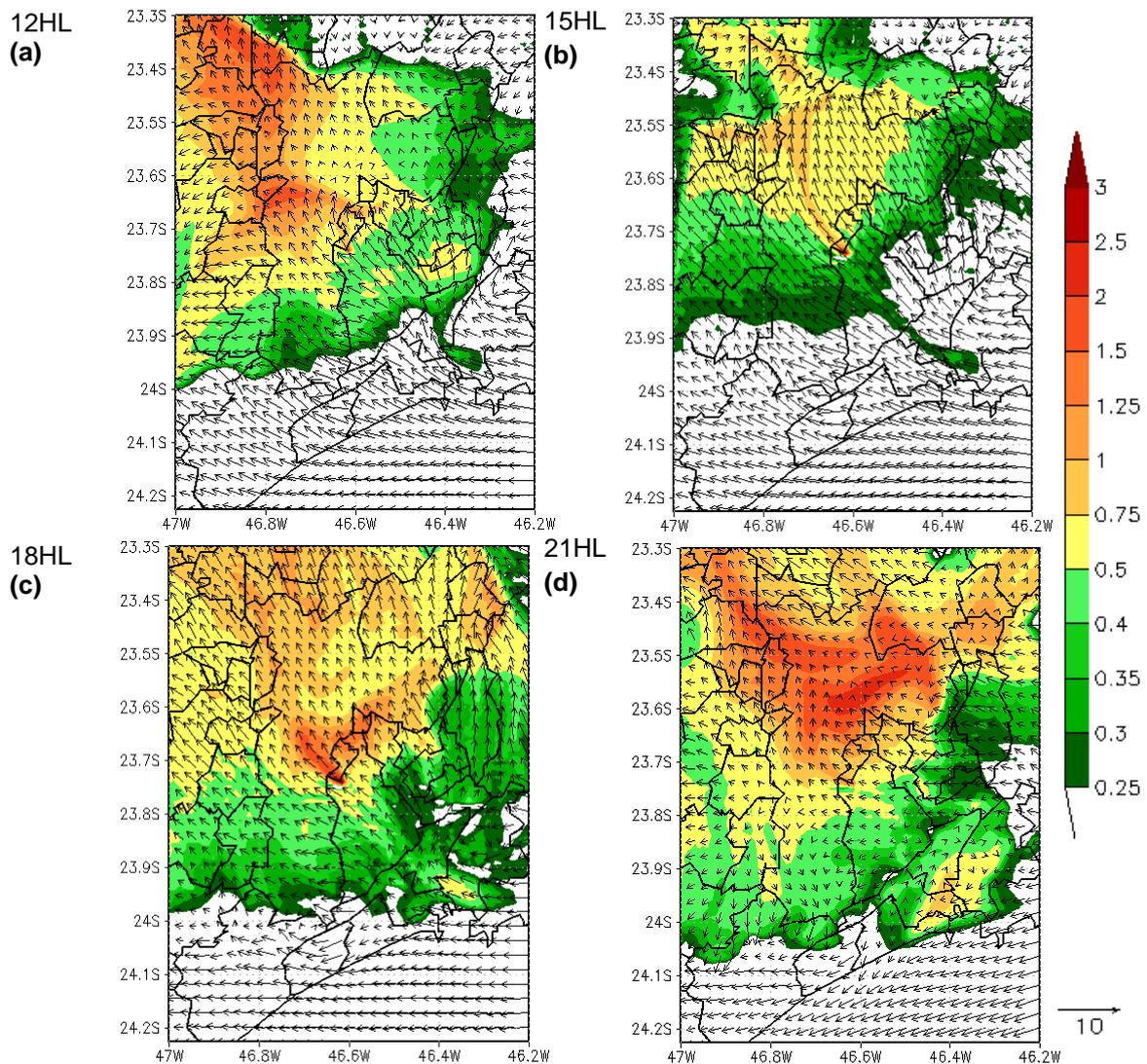


Figura 5.45 - Distribuição espacial do CO (ppm) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

A distribuição do NO_x na RMSP para o dia 26 de setembro é mostrada na Figura 5.46 e 5.47. No horário das 00HL e 03HL (Figura 5.46 (a) e (b)), a área urbana da RMSP apresenta valores da ordem de 10ppb a 30ppb com núcleos de 30ppb a 60ppb. A circulação da brisa terrestre transporta o NO_x com ventos de Sudeste/Leste para o interior da RMSP.

Nos horários subsequente, 06HL e 09HL (Figura 5.46 (c) e (d)), a concentração de NO_x atinge seus valores máximos, principalmente no horário das 06HL (Figura 5.46 (c)), devido a maiores emissões causada por veículos leves e pesados, com valores relativamente altos de 100ppb a 150ppb. Contudo, apesar da alta concentração desses poluentes, a

brisa marítima atua na região, carregando-os para regiões distantes da área urbana da RMSP.

As 12HL e as 15HL (Figura 5.47 (a) e (b)), os valores de NO_x no dia 26 são de 15ppb a 30ppb, apresentando alguns núcleos mais intensos na área urbana da RMSP. A brisa marítima já está bem configura sobre a RMSP. As 18HL e as 21HL, a concentração de NO_x volta a aumentar, mas a brisa marítima por estar acentuada transporta o NO_x sobre a área urbana. Destaca-se o horário das 21HL (Figura 5.47 (d)) em que os valores de NO_x na área urbana são mais altos (60ppb a 75ppb) e as regiões a nordeste com núcleos mais intensos (90ppb a 100ppb).

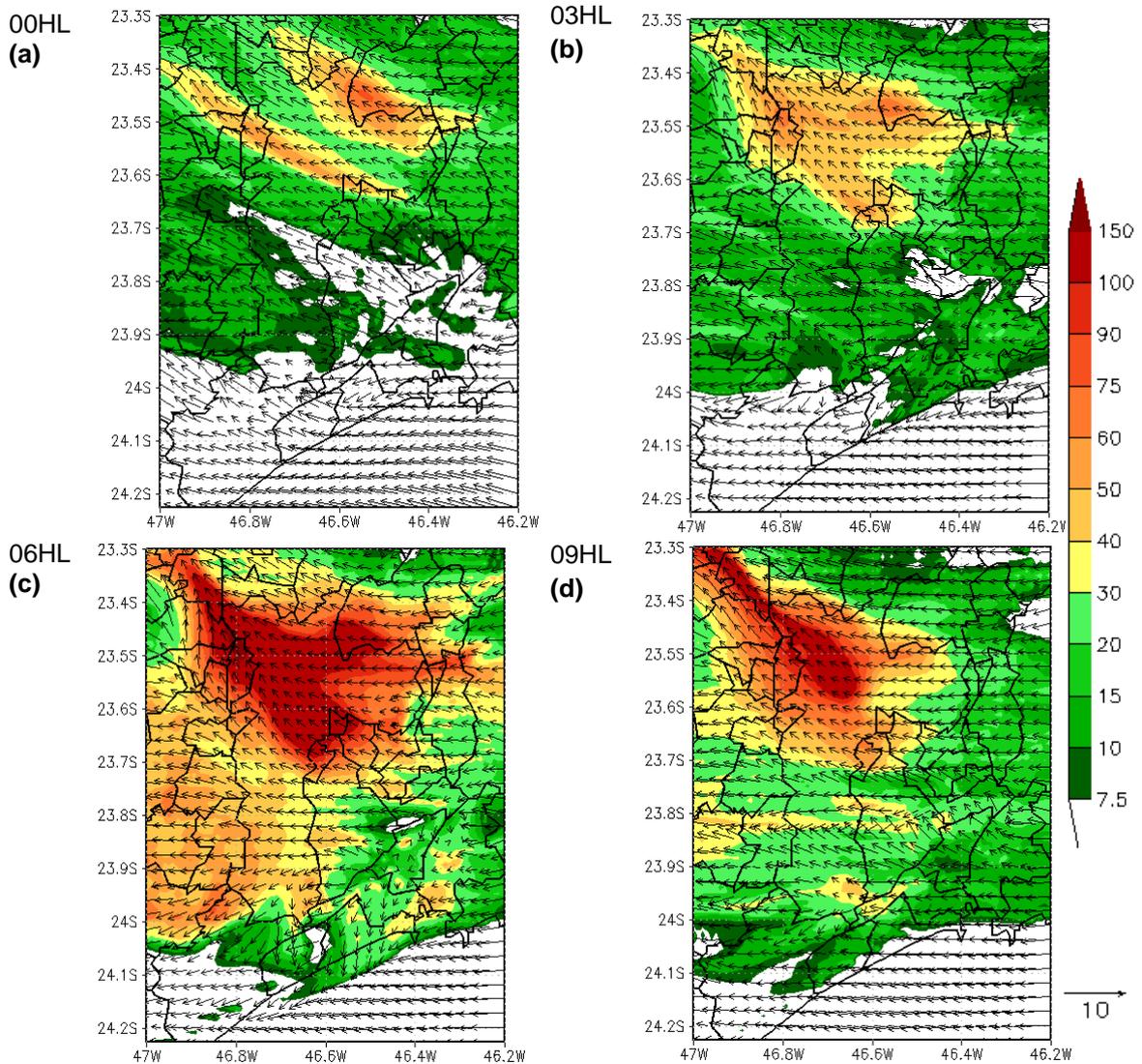


Figura 5.46 - Distribuição espacial do NO_x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de

setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

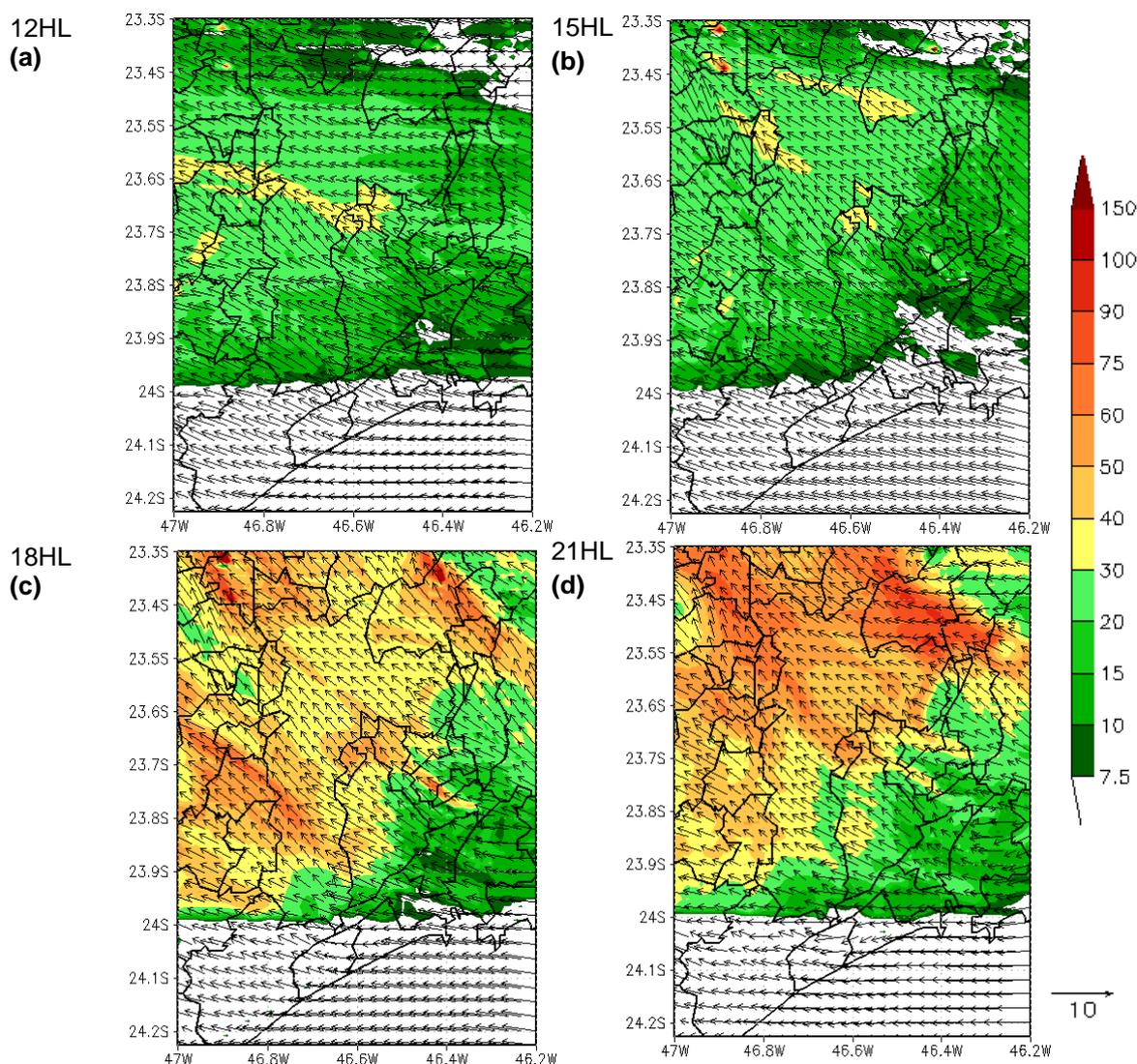


Figura 5.47 - Distribuição espacial do NO_x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

A distribuição espacial do NO_x para o dia 29 é apresentada nas Figuras 5.48 e 5.49. A concentração de NO_x na área urbana já é alta as 00HL e 03HL (Figura 5.48(a) e (b)), 30ppb a 60ppb, assim como observado no dia 26 a brisa terrestre carrega o NO_x para outras regiões. As 06HL e 09HL (Figura 5.48(c) e (d)) a concentração de NO_x é bem maior que no dia 26 de setembro, com núcleos intensos de 100ppb a 150ppb ao Sul e ao Norte da RMSP. A brisa terrestre ainda predomina as 06HL (Figura 5.48(c)), mas as 09HL (Figura 5.48(d)) com a mudança da brisa, há a

estagnação dos ventos na área urbana o que favorece esse aumento da concentração do NO_x.

As 12HL (Figura 5.49(a)) a concentração de NO_x começa a diminuir com a entrada da brisa marítima que não ultrapassa a latitude de 23,6°S, que parece empurrar o NO_x para as regiões fora da RMSP. No centro da área urbana é observada a estagnação/calmaria dos ventos no centro da RMSP. No horário das 15HL (Figura 5.49(b)) a brisa já avança e uma região de confluência do vento no centro da RMSP (latitude de 23,5°S) é observada, os valores de NO_x já são baixos (máximo de 20ppb a 30ppb).

As 18HL (Figura 5.49(c)) a brisa ainda está configurada e os valores de NO_x no padrão espacial voltam a subir (30ppb a 60ppb) em praticamente toda a RMSP. As 21HL (Figura 5.49(d)) a mudança da brisa é observada juntamente com a estagnação do vento no centro da área urbana, com a mudança dos ventos os valores de NO_x aumentam consideravelmente, atingindo núcleos de 150ppb em algumas áreas.

Na análise do padrão espacial do NO_x, assim como no CO, é observado que as máximas concentrações ocorrem em dois picos, nos horários entre 06HL e 09HL e entre 18HL e 21HL, que correspondem aos períodos de maior circulação de veículos (*horários de rush*). As circulações de brisa marítima e terrestre atuam de forma significativa sobre o padrão do NO_x, transportando o poluente para regiões distantes da área urbana da RMSP.

Com relação à ICU, nos horários de ocorrência da máxima ICU (entre 12HL e 15HL) nos dois dias de análise são encontrados baixos valores de NO_x na área urbana, uma vez que, a brisa espalha esse poluente. No entanto, também é perceptível que para o dia 29 as concentrações de NO_x são maiores que para o dia 26. Como descrito no CO, como o dia 29 apresenta maior aquecimento superficial, a brisa urbana é bem configurada e a brisa marítima demora a se propagar, ocasionado o maior acúmulo de poluentes na área urbana.

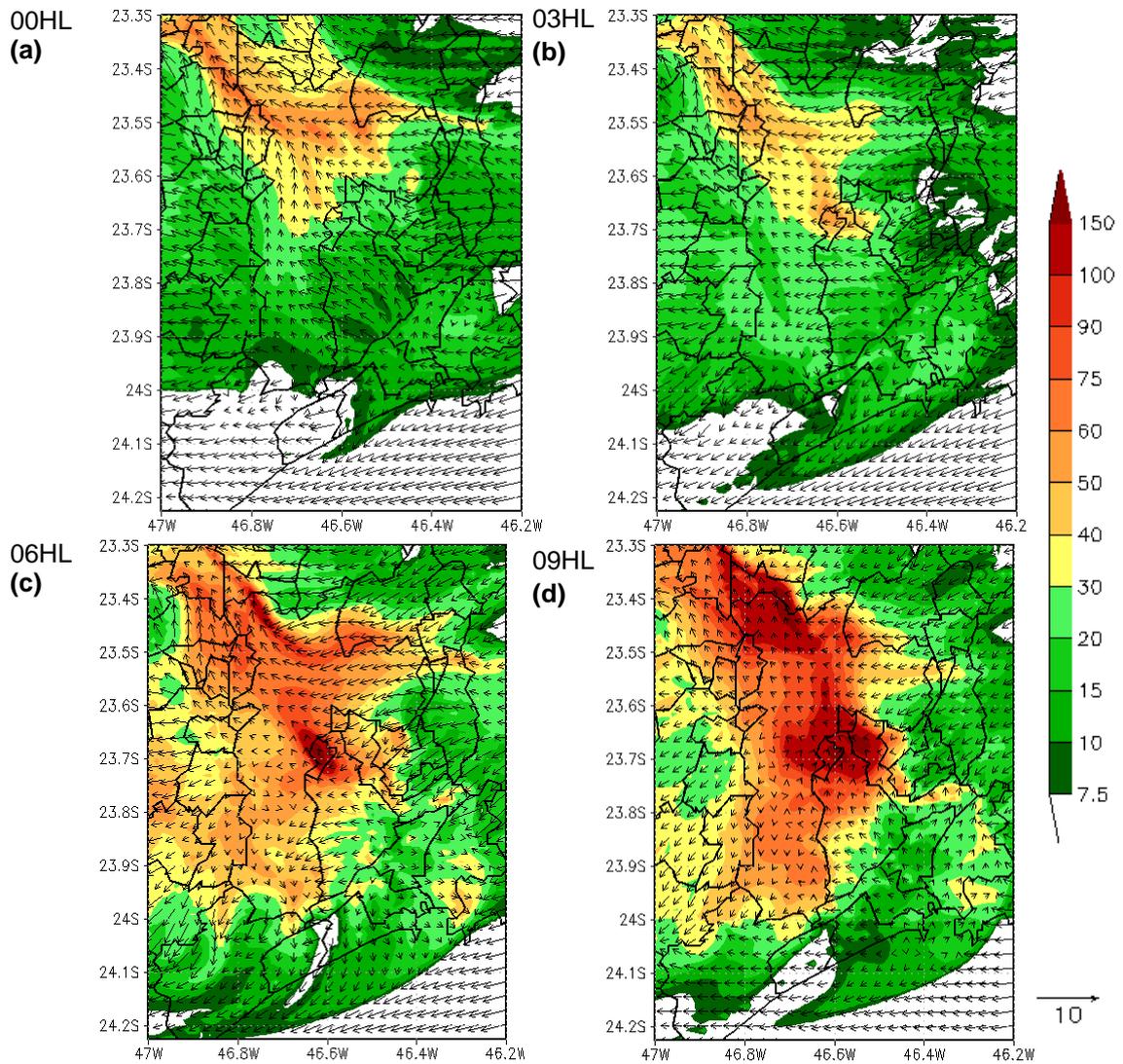


Figura 5.48 - Distribuição espacial do NO_x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

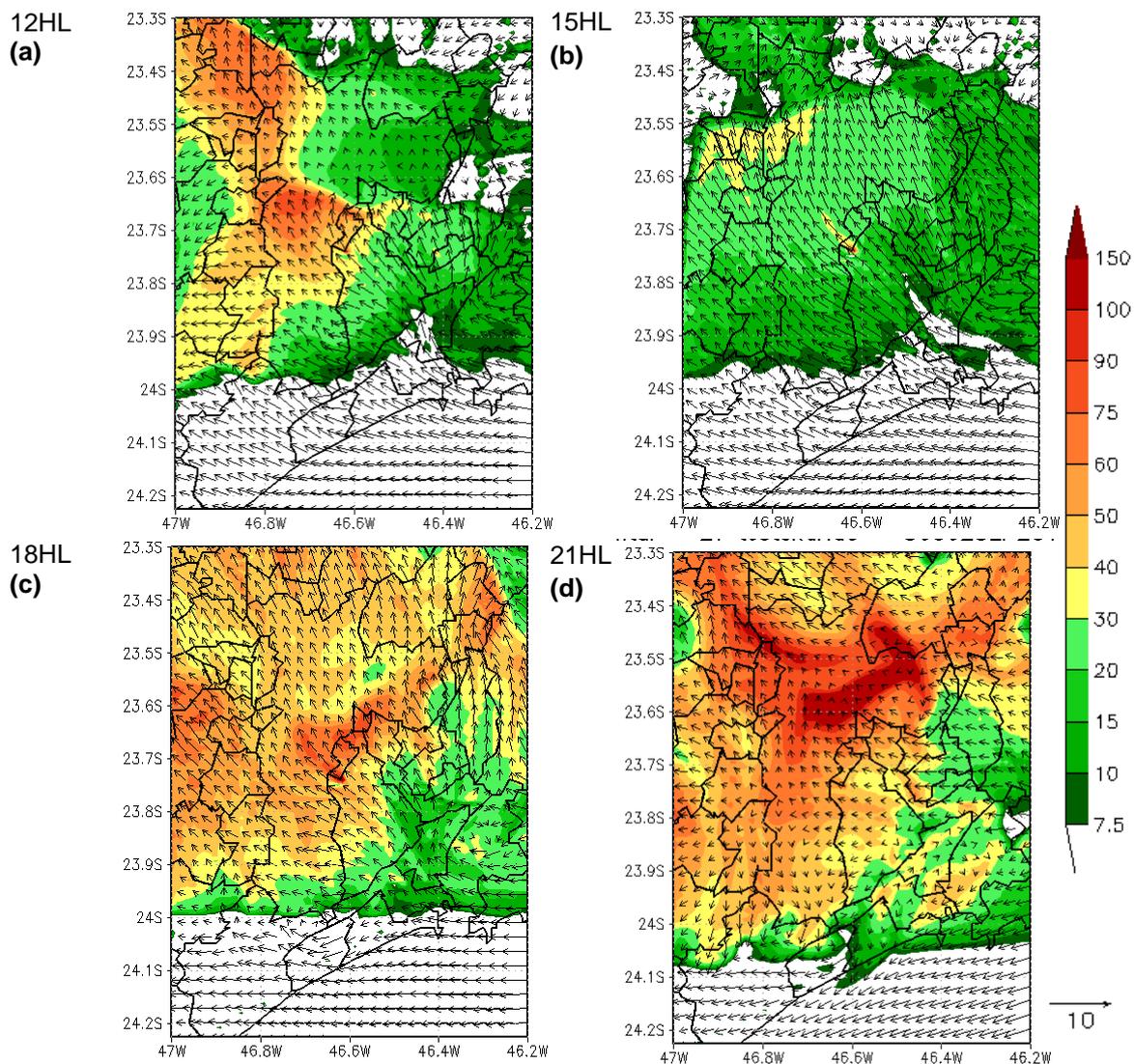


Figura 5.49 Distribuição espacial do NO_x (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

A distribuição espacial do O₃ para o dia 26 setembro é apresentada na Figura 5.50 e 5.51. Nos horários de 00HL a 09HL (Figura 5.50 (a) e (b)) os valores de O₃ na RMSP são inferiores a 35ppb, nesse período a circulação de brisa terrestre predomina sobre a região. O aumento da concentração de O₃ (valores de 35ppb a 70ppb) é verificado apenas nos horários das 12HL e 15HL do dia 26 ((Figura 5.51(c) e (d)), contudo, como a brisa marítima avança sobre a RMSP, os altos núcleos de O₃ ocorrem na região Noroeste da RMSP. Nos horários subsequentes no dia 26, 18HL e 21HL (Figura 5.51(c) e (d)) os valores de O₃ são abaixo de 35ppb.

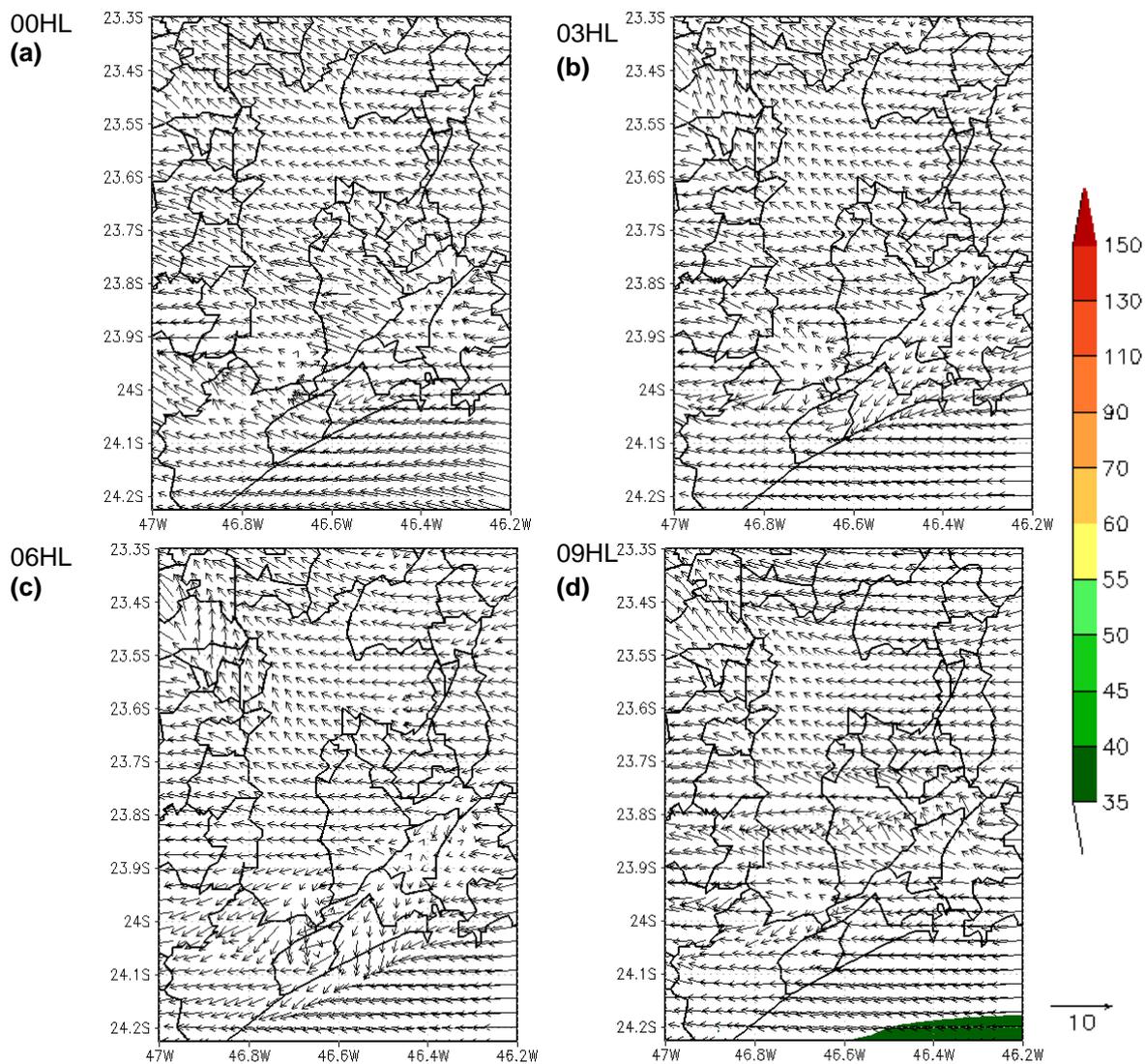


Figura 5.50 - Distribuição espacial do O₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

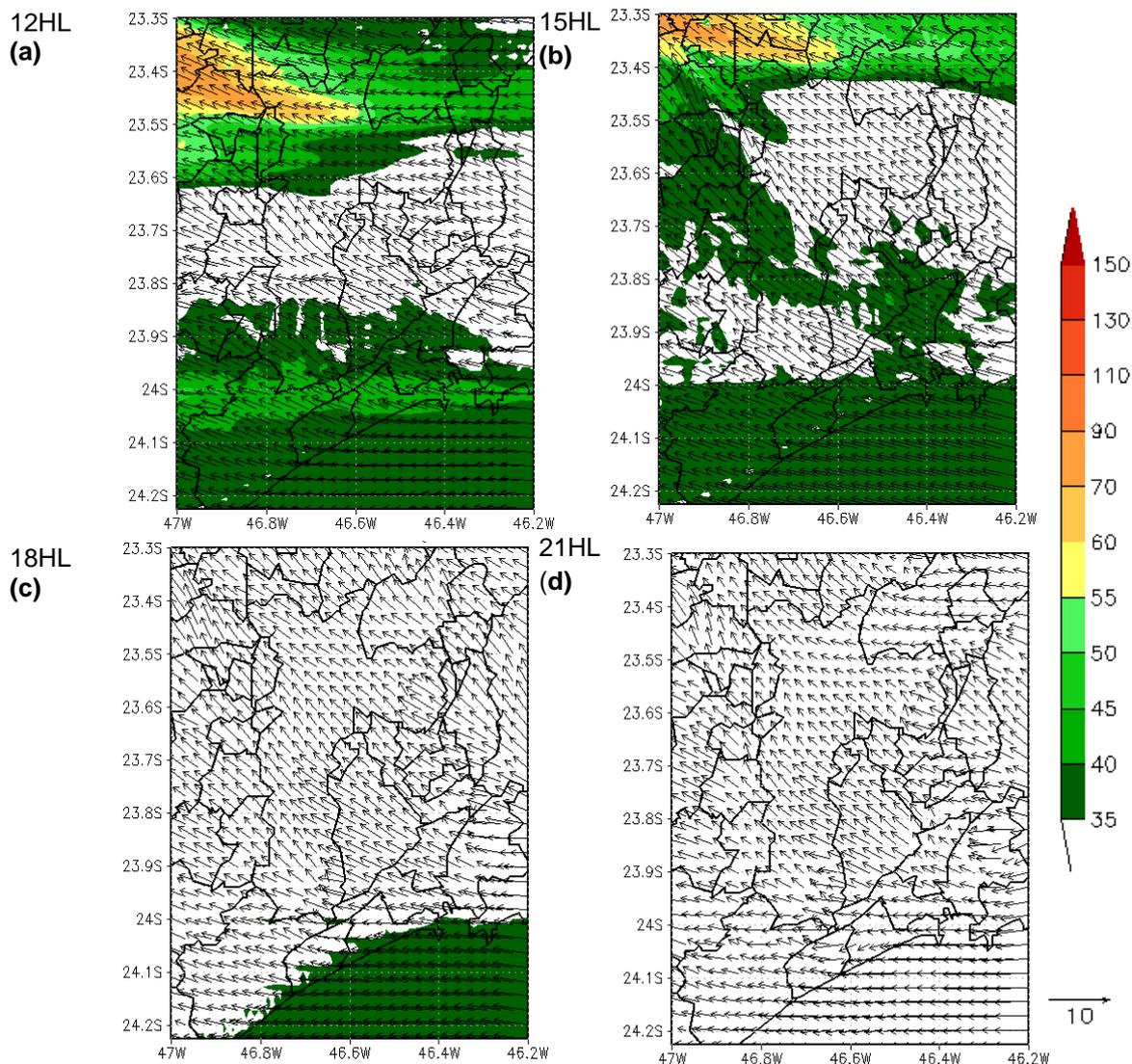


Figura 5.51- Distribuição espacial do O_3 (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 26 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

O padrão espacial de O_3 na RMSP para o dia 29 setembro em alguns horários (Figura 5.52 e 5.53) é significativamente diferente em relação ao dia 26. Nos horários da madrugada e início da manhã, 00HL a 09HL (Figura 5.52)) a concentração de O_3 na RMSP é inferior a 35ppb, assim como no dia 26. No horário das 12HL (Figura 5.53a)) do dia 29 os valores de O_3 na RMSP já são altos, da ordem de 60ppb a 90ppb, a brisa marítima se propaga pela RMSP até 23,6°S, porém é observado a calmaria/estagnação dos ventos no centro da área urbana da RMSP que dificulta a dispersão do O_3 e seus precursores. Com a propagação da

brisa marítima as 15HL (Figura 5.53b)) é observada a confluência dos ventos na latitude de 23,5°S e nas regiões ao Norte do centro da área urbana é verificado núcleos com altos valores de O₃ (90ppb a 110ppb e até valores de 110ppb a 130ppb), indicando que a brisa ao propagar-se pela RMSP transporta os precursores formadores de O₃ nos horários anteriores, e a medida que são transportados, o O₃ vai se formando.

Nos horários subsequentes, 18HL e 21HL (Figura 5.53(c) e (d)) a concentração de O₃ diminui, retornando a valores inferiores a 35ppb. No entanto, é observado que regiões fora do limite da área urbana apresentam núcleos de O₃ de cerca de 35ppb a 45ppb. Esses núcleos ocorrem devido ao transporte dos precursores do O₃, como NO_x e COV, que, ao se deslocarem, sofrem reações químicas gerando o O₃ nas regiões longe das fontes.

Na análise do padrão espacial do O₃ são observadas as maiores concentrações nos horários da ICU máxima (entre 12HL-15HL). Contudo, a distribuição espacial do O₃ comparado com a distribuição da temperatura (Figura 5.27 seção 5.4.1.3) não são iguais, uma vez que o O₃ se forma longe das fontes emissoras, mesmo assim, pode-se concluir que há uma interação positiva da ICU e o O₃ no padrão espacial.

Assim como observado no CO e no NO_x, o dia 29 também apresenta altas concentrações de O₃ em relação ao dia 26. Como o ozônio tem forte dependência com a quantidade de radiação, e como esta ocasiona num maior aquecimento da superfície, logo, o dia 29 apresenta as maiores concentrações de O₃.

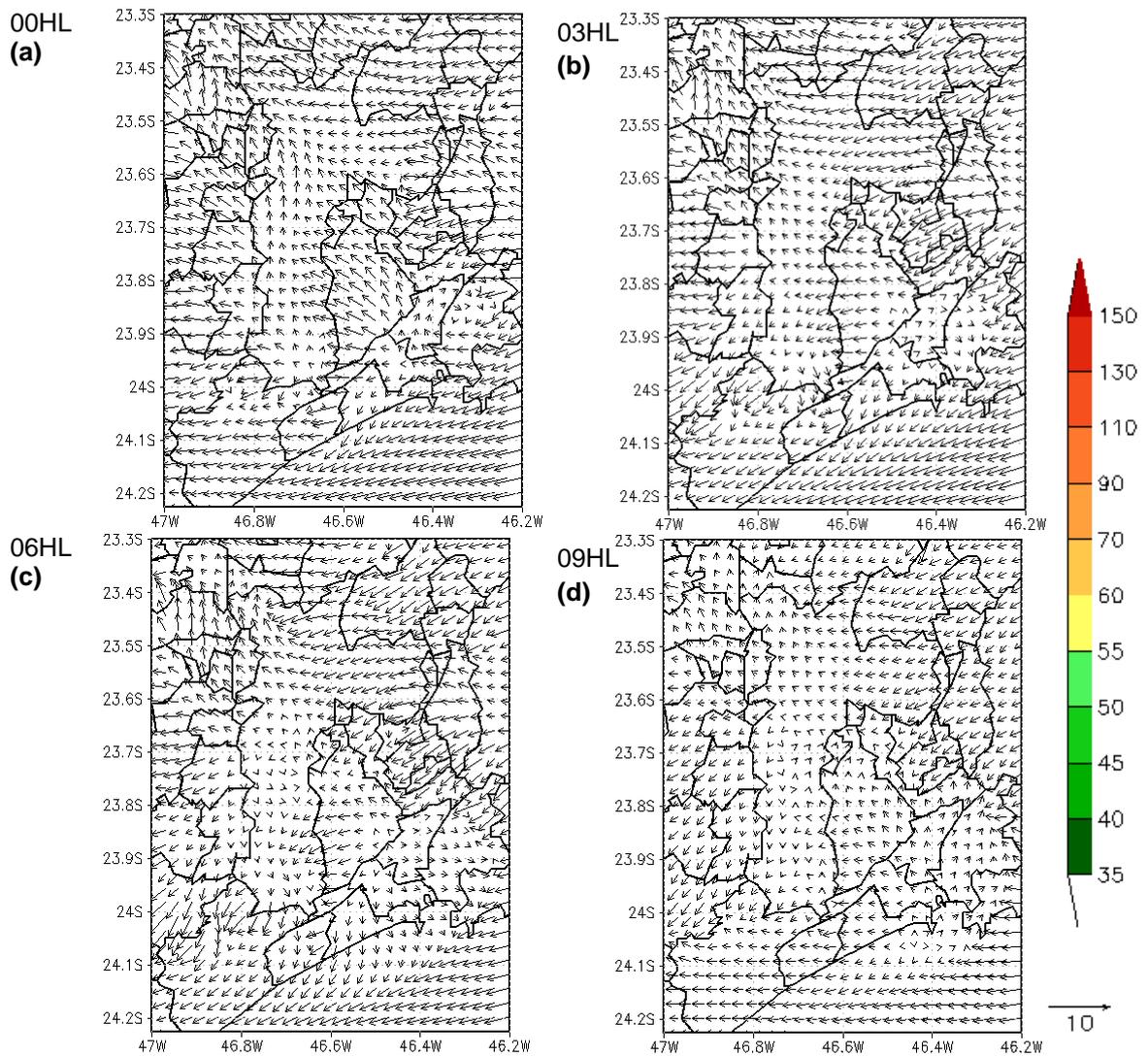


Figura 5.52 - Distribuição espacial do O₃ (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 00HL, (b) 03HL, (c) 06HL e (d) 09HL.

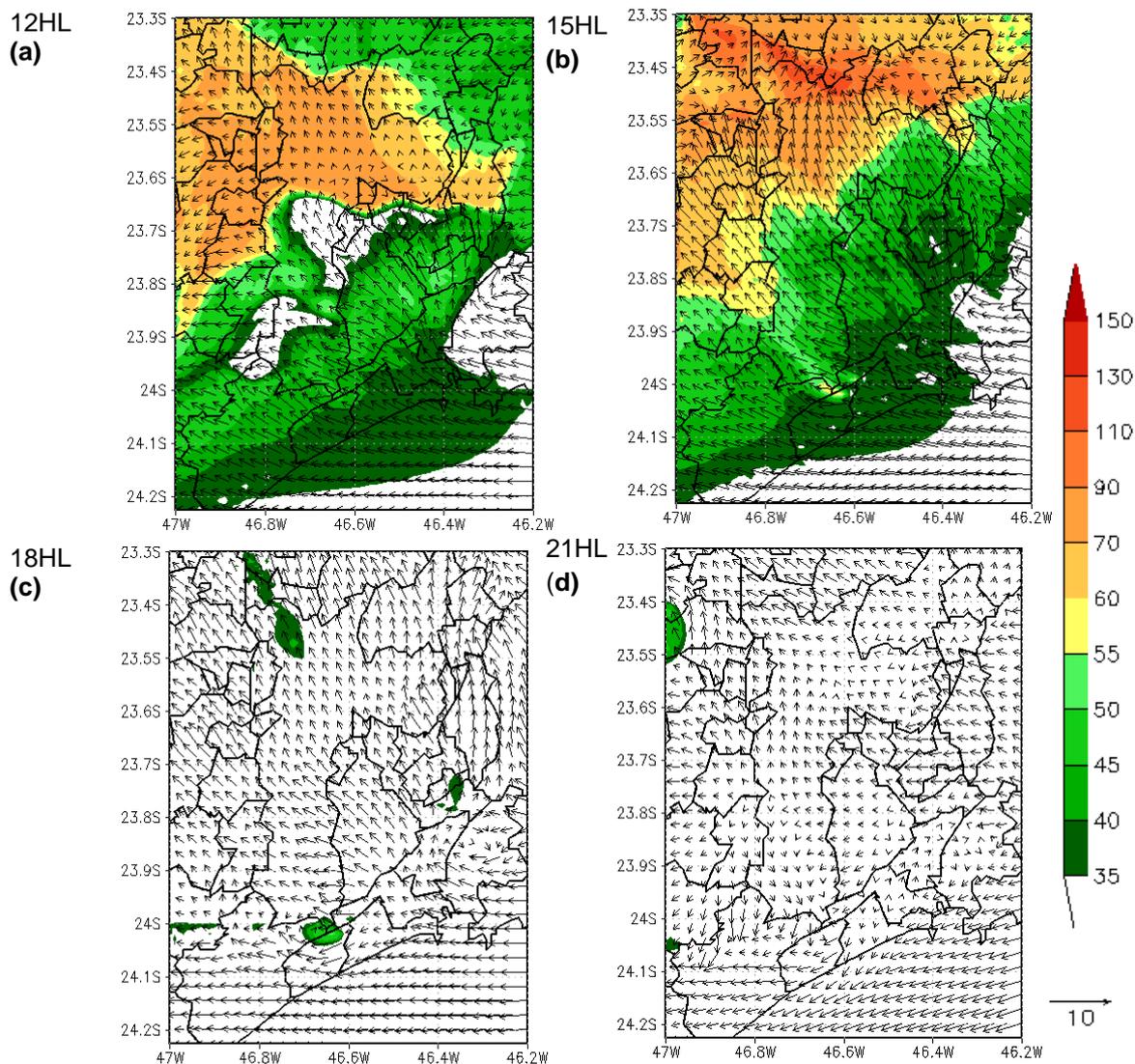


Figura 5.53 Distribuição espacial do O_3 (ppb) e vento resultados da simulação numérica ao nível de 34,2 m para o dia 29 de setembro de 2011 as (a) 12HL, (b) 15HL, (c) 18HL e (d) 21HL.

Na análise dos padrões espaciais dos poluentes na RMSP um dos aspectos mais relevantes encontrados nos resultados é a importância da brisa sobre a dispersão dos poluentes, que atua como transporte para regiões distantes da área urbana da RMSP. Destaca-se que evidentemente há poluentes emitidos fora da área urbana que podem ser transportados para a RMSP.

Com relação à interação dos poluentes com a ICU foi encontrado que o O_3 apresenta um comportamento espacial similar ao padrão de temperatura que caracteriza a ICU. Adicionalmente, é verificado que dias com um maior aquecimento na superfície, principalmente na área urbana,

as concentrações dos poluentes são mais elevadas, uma vez que, o maior aquecimento e assim temperaturas mais altas geram na área urbana a formação de uma brisa bem estabelecida (brisa urbana), de modo que, dificulta e atrasa a entrada da brisa marítima no centro da RMSP.

5.4.2.3. Análise vertical

Além dos resultados apresentados sobre a interação da ICU e os poluentes atmosféricos no padrão temporal e espacial, também são analisados os perfis verticais de cada estação ao longo do período de estudo.

As estações utilizadas para essa análise são: São Caetano do Sul, Pinheiros, Congonhas e PD. Pedro II. Através dessa análise é possível identificar como dias de maior aquecimento na superfície conduzem as circulações verticais (brisa urbana) e, portanto a concentração dos poluentes.

A Figura 5.54 apresenta o perfil vertical do CO para os dias 26 a 30 de setembro nas quatro estações. Os resultados mostram que, no decorrer dos dias 26 a 30, a concentração do CO aumenta próximo à superfície, coincidindo com o mesmo comportamento da temperatura (aquecimento) que se intensifica ao longo do período como mostrado na análise do perfil vertical de temperatura (Figura 5.38).

Adicionalmente, são evidenciadas em todas as estações correntes ascendentes associadas à brisa urbana (circulação típica da ICU), sendo que nos dias 29 e 30 a corrente ascendente parece ser mais intensa e profunda na atmosfera. Essas correntes ascendentes da brisa urbana distribuem os poluentes na atmosfera, contudo, são verificados que as correntes descendentes de retorno dessa brisa, atuam no sentido de prejudicar a qualidade do ar na área urbana, uma vez que à medida que os poluentes são levados para altos níveis pela corrente vertical, a corrente de retorno carrega os poluentes de volta para a área urbana.

Na análise entre as estações é possível observar que a estação de Pinheiros em praticamente todo o período (exceto dia 26) apresenta maior dispersão vertical de CO, alcançando altos níveis (de até 1100 a 1200 metros). A estação de Congonhas, São Caetano do Sul e PD Pedro parece ter uma menor dispersão da concentração de CO com a altura, chegando a níveis de até 900 metros nos dias 26 a 28.

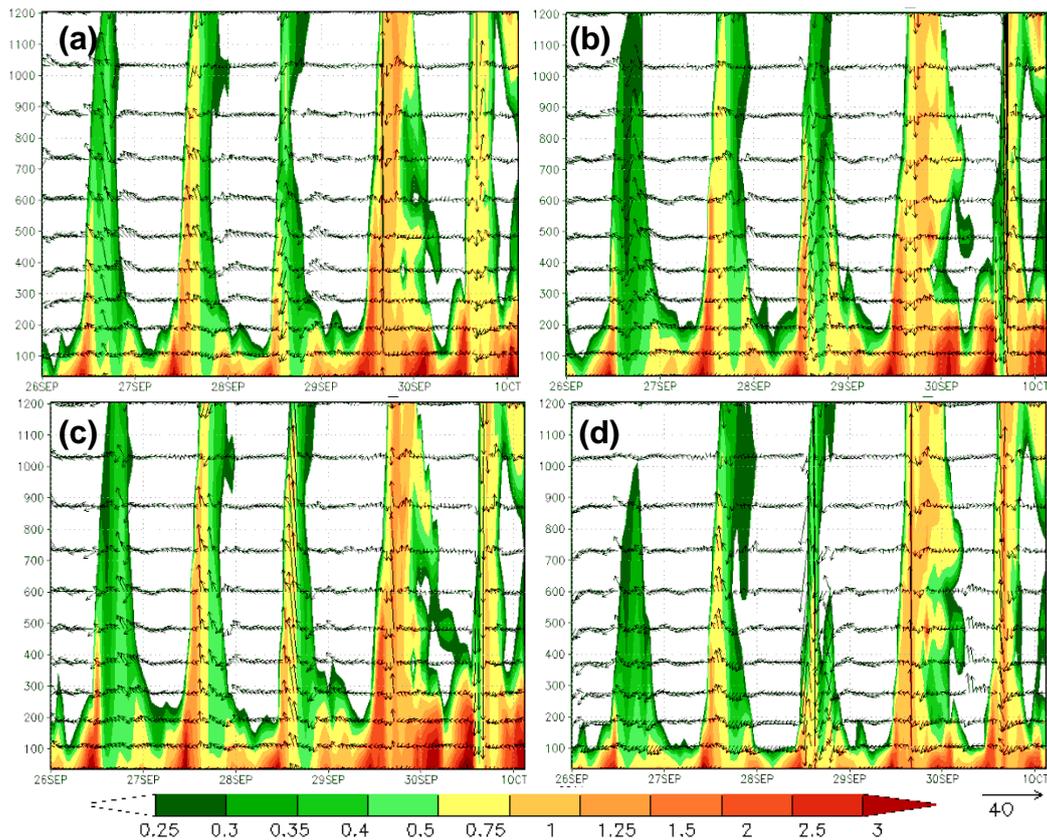


Figura 5.54 – Evolução temporal do perfil vertical de CO e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.

No perfil vertical da concentração de NO_x para as estações Congonhas, PD Pedro, Pinheiros e São Caetano do Sul apresentadas na Figura 5.55, também são observados o aumento da concentração do NO_x estendendo-se da superfície até altos níveis com o decorrer do período, sendo os dias 29 e 30 com as concentrações de NO_x mais altas. Confirmando um feedback entre um maior aquecimento em superfície (IICU mais intensas) e a intensificação da brisa urbana, o que leva a correntes de retorno bem

configuradas sobre a região da estação e desta forma há o aumento da concentração de NO_x .

Contudo, é interessante observar que diferentemente ao CO , a dispersão vertical do NO_x não é tão profunda, ou seja, em praticamente todos os dias a concentração de NO_x é alta somente até os níveis de 800 e 900 metros em média. No entanto, no dia 29 é observada uma alta concentração de NO_x que vai desde a superfície até 1200 metros, exceto a estação de São Caetano do Sul e PD Pedro.

Entre as estações analisadas, a estação de Pinheiros é a que apresenta ao longo do período de 26 a 30, a maior concentração de NO_x desde a superfície até 1200 metros.

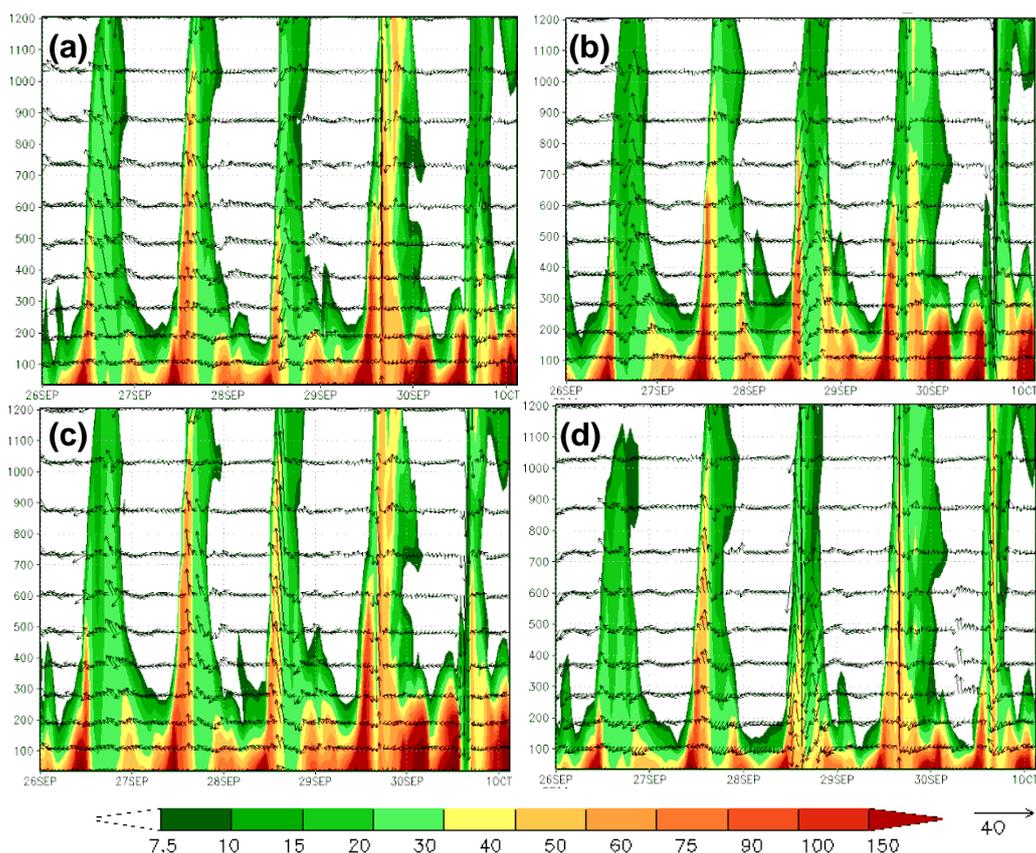


Figura 5.55 – Evolução temporal do perfil vertical de NO_x e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.

O perfil vertical de O_3 é mostrado na Figura 5.56 para as 4 estações de análise. Do mesmo modo ao observado no CO e no NO_x , é verificado o

aumento da concentração dos níveis de O_3 ao decorrer do período de 26 a 30. O aumento dos níveis de O_3 nos dias 26 a 28 são observados apenas em níveis mais elevados (alturas superiores a 500 metros), enquanto para os dias 29 e 30 a concentração de O_3 é alta desde a superfície até o nível de 1200 metros. Tal comportamento nitidamente revela a relação de dependência da concentração do O_3 e a ICU (aquecimento em superfície). Como o O_3 é um poluente secundário, sua concentração aumenta com a altitude e a distância das áreas fontes.

A estação que apresenta as maiores concentrações de O_3 é a estação de São Caetano do Sul, na qual são verificados movimentos ascendentes e descendentes mais intensos, os quais aumentam os níveis de O_3 próximo da superfície.

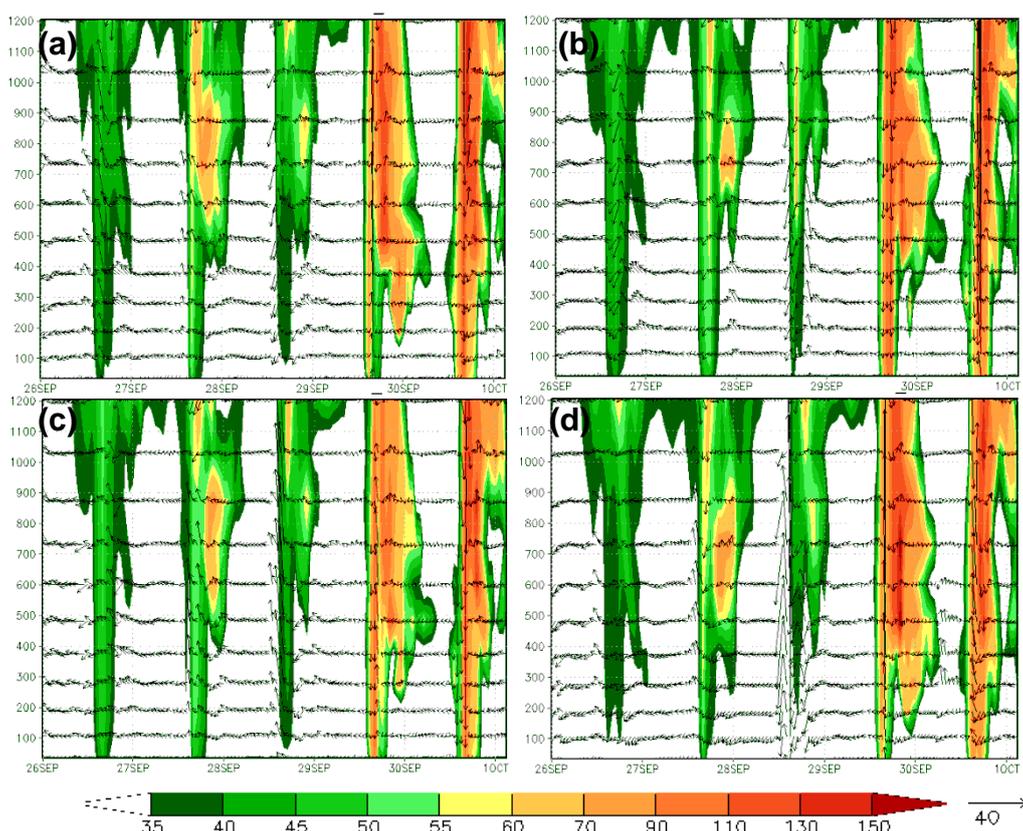


Figura 5.56 – Evolução temporal do perfil vertical de O_3 e vento para as estações de (a) Congonhas, (b) PD Pedro II, (c) Pinheiros e (d) São Caetano do Sul.

A análise do perfil vertical possibilitou reconhecer a relação da ICU e a concentrações dos poluentes desde a superfície a níveis mais altos, de modo que é identificado o feedback entre o aumento da concentração do

CO, NO_x e O₃ nos dias mais quentes no período de estudo. Sendo evidenciado, portanto, que quando o aquecimento é mais intenso na superfície das áreas urbanas, a brisa urbana se configura de maneira que movimentos verticais ascendentes predominam sobre a área alcançando níveis profundos na atmosfera e desta forma, levando os poluentes da superfície até altos níveis. Entretanto, tais movimentos verticais provocam correntes descendentes que retornam para a superfície carregando novamente os poluentes para a área urbana.

5.5. Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou uma análise dos resultados da simulação numérica com o modelo BRAMS e as parametrizações urbanas que foram implementadas com o objetivo de representar mais adequadamente as características da área urbana e, portanto, identificar as relações entre a ICU e os poluentes atmosféricos.

Como primeira parte deste capítulo, foram investigadas as parametrizações de área urbana do modelo BRAMS, as quais demonstraram eficiência na caracterização dos principais padrões meteorológicos da área urbana, contudo, os resultados das parametrizações bidimensionais (representação de telhado e cânions da área urbana) mostraram-se superiores a parametrização mais simples.

Na segunda parte dos resultados foram realizadas simulações para o período específico avaliando a partir de análises temporais, espaciais e verticais a relação de feedback entre a ICU e a concentração dos poluentes.

Na análise de evolução temporal foi encontrada uma relação positiva da concentração do CO e NO_x com a ICU, onde a concentração mostrou-se aumentar com dias de ICU mais altas. Para o O₃ foi observado uma interação de fase positiva, de tal forma, que os horários da máxima concentração de O₃ coincidem com os horários de máxima ICU.

No padrão espacial foi identificado que a distribuição dos poluentes na RMSP é fortemente influenciada pelas circulações locais de brisa (marítima/terrestre e urbana), que atuam de modo que a concentração dos poluentes seja alta em virtude do maior aquecimento na superfície.

Na análise vertical foi observado que os dias com o maior aquecimento apresentam as maiores concentrações de poluentes desde a superfície até altos níveis da atmosfera. Além disso, foi observado que a brisa urbana, que tipicamente ocorre em dias com ICU mais intensas, contribui para aumentar a concentração dos poluentes na área urbana.

De maneira geral, a avaliação entre a ICU e os poluentes realizada neste capítulo através da modelagem numérica pode corroborar com as análises observacionais apresentadas no capítulo 4.

6 CONCLUSÕES

No presente estudo foram investigadas as relações entre a Ilha de Calor Urbana (ICU) e os poluentes atmosféricos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) através da utilização de dados observados e do modelo atmosférico-químico, BRAMS versão 5.0. A principal vertente de análise desse estudo foi à necessidade de reconhecer as possíveis interações entre o fenômeno de escala local como a ICU e o comportamento e distribuição dos poluentes.

No contexto da tese, antes de avaliar as relações existentes entre a ICU e a concentração de poluentes, primeiramente identificou-se os padrões espaciais e temporais da ICU e da concentração de cada poluente na RMSP. Para tal foram utilizadas técnicas de análise multivariada (Função Ortogonal Empírica (EOF) e a Análise de Cluster (AC)) nos dados de temperatura do ar observados no período 2002-2011.

Na análise de EOF, dois modos de análise foram utilizados o modo-S (que permiti identificar as características do padrão temporal da anomalia de temperatura) e o modo-T (que permiti identificar as características do padrão espacial da anomalia de temperatura). Na análise no modo-T, três modos principais de variabilidade foram identificados na RMSP, os quais juntos explicam 99% da variância total dos dados. O primeiro modo explicou 67% da variância, o segundo modo explicou 24% e o terceiro modo com 8%. O primeiro e o terceiro modos da EOF estão associados com os mecanismos de circulação dos ventos na RMSP relacionados com a brisa marítima, enquanto que o segundo modo está relacionado com a urbanização e a liberação de calor armazenado no dossel urbano e pelas fontes antropogênicas, bem como com a circulação dos ventos locais na RMSP. Na análise da EOF no modo-S, apenas dois modos de variabilidade foram encontrados, o primeiro modo que explica 49% da variância total e o segundo modo com 31% da variância. No modo-S, o primeiro modo representa o padrão espacial da ICU na RMSP, e é semelhante ao segundo modo da EOF no modo-T. Com a análise de EOF

para o modo-S e o modo-T foram encontrados o padrão espacial da ICU na RMSP.

Com a análise de cluster para a temperatura do ar foram identificados seis grupos homogêneos, os quais mostraram ser consistentes com os padrões espaciais encontrados na EOF. As identificações desses grupos permitiram a análise das estimativas da intensidade da ICU (IICU). O grupo 6 (estação de Parelheiros) foi considerado como o grupo não-urbano/vegetado, por estar mais afastado da área central da RMSP, além da presença de área verde, e os demais grupos (1, 2, 3, 4 e 5) foram considerados como os grupos urbanos/suburbanos. Assim, foram calculados distintos casos de IICU pela diferença entre os grupos urbanos e o grupo não-urbano. As estimativas da IICU mostraram que as intensidades máximas e mínimas da IICU ocorrem em horários diferentes para cada caso, demonstrando que a escolha de estações adotadas pode refletir a distintos padrões de IICU. Portanto, critérios de escolha devem ser adotados ao selecionar as estações.

Para detalhar a IICU, o caso de análise adotado como referência foi o caso 1, que corresponde a estimativa da IICU pela diferença da temperatura entre a estação São Caetano do Sul e Parelheiros. Para esse caso, a ICU tem um comportamento diurno com intensidade máxima de 1°C ocorrendo entre 14:00-16:00HL e sua IICU mínima de $-0,5^{\circ}\text{C}$ entre 07:00-09:00HL. Esse padrão diurno da IICU concorda com outros estudos que também já apresentaram esse padrão. Na análise sazonal da IICU foi observado que a primavera é a estação cujos valores de IICU são os maiores valores de máxima e mínima IICU. Cada estação apresenta diferentes horários de intensidade máxima da ICU.

Com a utilização das técnicas de análise multivariada, foram estabelecidos os principais padrões de anomalias de temperatura para a RMSP. As duas análises de EOF permitiram identificar diferentes regiões de núcleos quentes de temperatura do ar na RMSP, assim como suas intensidades, tamanhos, localizações e variações ao longo do ciclo diurno.

Na análise do comportamento dos poluentes atmosféricos na RMSP foram reconhecidos os grupos de estações que apresentam as mesmas características, como por exemplo, no agrupamento do CO em que estações que estão localizadas em áreas comerciais (alto tráfego de veículos) e áreas indústrias (intensas emissões) compõem um mesmo grupo. Da mesma maneira, que estações localizadas em áreas residenciais (maior presença de vegetação e menor circulação de veículos) se agrupam. Dentre os poluentes que se destacam na AC, ressalta-se o comportamento do ozônio cuja maior concentração corresponde ao grupo de estações que mesmo localizadas em áreas com predomínio de vegetação, são áreas propensas à formação do O₃.

Na avaliação da interação da ICU e os poluentes atmosféricos pelos dados observados, dois métodos de análise foram empregados para encontrar essa interação. No primeiro método foi analisado a distribuição da concentração dos poluentes em diferentes valores de ICU e em 5 níveis de intervalos de IICU, enquanto no segundo método foi utilizada o teste de comparação de médias de Duncan.

No primeiro método foi demonstrada uma clara interação da concentração do O₃ e do PM10 com a IICU, ambos os poluentes apresentam um padrão de aumento de suas taxas com a intensificação da ICU. Para o CO e NO_x, os resultados apresentaram padrões distintos, primeiramente uma tendência de elevação da concentração nos primeiros níveis da IICU, e a partir de um valor de corte da IICU a concentração do CO e do NO_x parecem diminuir ou mesmo estagnar. A concentração do CO e do NO_x mostraram haver uma relação com a intensificação da IICU, no entanto, essa interação parece não ser positiva quando a ICU é mais intensa.

No segundo método, a aplicação do teste de médias de Duncan, permitiu identificar estatisticamente se as médias das concentrações em cada nível eram iguais ou diferentes entre si. Para o O₃ e para o PM10 os resultados se mostraram satisfatoriamente coerentes com os resultados do primeiro método. Estatisticamente, mesmo que os valores médios das concentrações sejam similares nos primeiros níveis de IICU, foi

observado um aumento dos valores médios da concentração de O₃ e PM₁₀ com a intensificação da ICU. O teste de Duncan para o NO_x e o CO observados demonstraram resultados imprecisos. Para o CO apenas a primavera de 2011 apresentou resultados estatísticos favoráveis, os quais distinguem a interação do aumento da concentração de CO com a intensificação da ICU. Para o NO_x, apesar da imprecisão encontrada nos níveis de ICU com as médias de concentração, foi possível observar uma relação positiva do aumento da concentração com a ICU.

Com os métodos da análise observacional foram evidenciados em média que a concentração dos poluentes aumenta com a intensidade da ICU. As distintas análises revelaram que ICU mais intensas induzem as maiores concentrações de poluentes, uma vez que ilha de calor bem configurada induz as circulações de brisa urbana. Essa circulação por ser caracterizada pela convergência do ar quente na área urbana e transporte de ar frio, causa acumulação dos precursores de O₃, bem como outros poluentes do ar, o que agrava a qualidade do ar na região.

Na modelagem numérica, três esquemas de parametrizações urbanas foram implementadas no modelo BRAMS versão 5.0: o esquema 1T, 2T e MORUSES. Pelas análises realizadas, os resultados mostraram que todos os esquemas urbanos representam de maneira satisfatória a ICU na RMSP, assim como os aspectos espaciais e verticais da configuração da brisa urbana. No entanto, os esquemas com a configuração bidimensional (cânions e telhados) apresentaram resultados melhores e mais coerentes na representação da área urbana. Como por exemplo, na análise do padrão espacial do dia 29 as 21HL, em que a simulação com o MORUSES apresentou temperaturas elevadas na área urbana da RMSP demonstrando que o calor é aprisionado na área urbana por mais tempo nesse esquema. Da mesma forma, foi observado na análise do perfil vertical para o dia 26 que a simulação com o esquema 2T apresenta uma corrente ascendente intensa na área urbana, atingindo níveis mais altos que as demais simulações. Portanto, na análise comparativa entre as parametrizações, os esquemas com a configuração de duas camadas

(telhado e cânion), 2T e MORUSES, são mais apropriados na representação dos fenômenos da escala da área urbana.

Na investigação dos efeitos combinados da ICU e dos poluentes através das simulações com o modelo BRAMS foi apresentada três análises distintas da interação dos poluentes com a ICU.

Na evolução temporal foram observados uma interação de fase positiva entre a máxima concentração do O_3 e a máxima intensidade da ilha de calor, assim como, a existência de uma relação positiva entre a ocorrência de intensas ICU e o aumento da concentração do CO, NO_x e O_3 . Adicionalmente, para o NO_x e o CO destaca-se que nos dias com maior aquecimento na superfície (ICU mais altas), o ciclo diurno da concentração desses poluentes também se altera, no comportamento do diurno é observado dois picos de máxima (um no início da manhã e outro no final da tarde/início da noite) muito bem estabelecidos.

No padrão espacial foram observadas concentrações mais elevadas em dias com um maior aquecimento na superfície, uma vez que, dias com ICU mais intensas ocasionam movimentos ascendentes que caracterizam a brisa urbana. Tal circulação atua de modo a dificultar a entrada da brisa marítima no centro da área urbana da RMSP. Além disso, foi evidenciado que a distribuição espacial do O_3 apresenta um comportamento similar ao padrão de temperatura que caracteriza a ICU.

Na análise do perfil vertical dos três poluentes foi verificado o aumento da concentração dos poluentes ao decorrer dos dias à medida que se intensifica a temperatura na superfície, portando, evidenciando a maior dispersão vertical dos poluentes nos dias mais quentes. Esse comportamento ocorre, uma vez que, quando o aquecimento é mais intenso na superfície das áreas urbanas, a brisa urbana está bem configurada agindo de maneira que os movimentos ascendentes levam consigo os poluentes até altos níveis. No entanto, correntes descendentes de retorno, trazem de volta os poluentes para as áreas urbanas. Sendo

assim, em dias de ICU mais intensas há um agravamento da qualidade do ar nas áreas urbanas.

A partir dos resultados discutidos reconheceram-se os padrões temporais e espaciais da ICU bem como os padrões dos poluentes atmosféricos na RMSP. Adicionalmente, através da modelagem numérica e observacional foram identificados os efeitos combinados da ICU e dos poluentes atmosféricos.

7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste estudo foi possível identificar que análises observacionais e de modelagem numérica para a área urbana precisam de maior investigação na comunidade científica, uma vez que o número de residentes em áreas urbanas principalmente no Brasil aumenta a cada ano, o que acarreta em um crescimento alarmante e sem planejamento das megacidades. Contudo, reconhecem-se as limitações e desafios encontrados quando se enfatiza estudos da área urbana, como a carência de observações, a má distribuição espacial das estações de medidas, a falta de campanhas experimentais que caracterizam a meteorologia da área urbana, assim como representações mais adequadas dos parâmetros urbanos como altura dos prédios, larguras de ruas e quantidade de áreas verdes como parques que estão inseridos dentro das áreas urbanas. Além disso, limitações no modelo numérico também são encontradas como restrições no uso de domínios com alta resolução, que além de terem alto custo computacional exigem condições de contorno e iniciais mais refinadas, melhor representação das emissões urbanas, etc.

Dessa forma, sugerem - se alguns tópicos para trabalhos futuros:

- Testes de sensibilidade que avaliem os efeitos dos parâmetros urbanos na ICU e conseqüentemente na interação com os poluentes atmosféricos;
- Realização de simulações sem a presença da área urbana a fim de verificar o impacto na ICU;
- Avaliação da interação da ICU e os poluentes em outras estações do ano;
- Investigação dos efeitos combinados da ICU e dos poluentes em outras megacidades do Brasil, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro;
- Avaliações sobre as forçantes remotas na ICU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELSHON, A.; STIED, D.; SANBORN M.D.; WEIR E. Identifying and managing adverse environmental health effects: 2. Outdoor air pollution. **Canadian Medical Association Journal**, v. 166, n. 9, p.1161-1167, 2002.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International journal of climatology**, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003.
- AGARWAL, M.; TANDON, A. Modeling of the Urban Heat Island in the Form of Mesoscale Wind and of its Effect on Air Pollution Dispersal. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, p. 2520–2530, 2010.
- ALONSO, M. F.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; DA FONSECA, R. M.; MARÉCAL, V.; PIRRE, M.; KLENNER, L. G. An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 39, p. 5072-5083, 2010.
- ANDRADE, M.; YNOUE, R. Y.; FREITAS, E. D.; TODESCO, E.; VELA, A. V.; IBARRA, S.; CARVALHO, V. S. B. Air quality forecasting system for Southeastern Brazil. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, 2015.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International journal of climatology**, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003.
- ARYA, P. S. **Introduction to micrometeorology**. Academic Press, 2001.
- BARROS, V. et al. Climate variability over subtropical South America and the South American monsoon: a review. **Meteorologica**, v. 27, n. 1-2, p. 33-57, 2002.
- BASTOS, V. S. B. **Desagregação de dados de satélite para análise de ilhas de calor de superfície**. 2014. 115 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/06.23.16.30-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento

Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GH3EP2>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BERNADET, L. R. **Simulação numérica da brisa marítima e de sua interação com a topografia na presença de processos úmidos**. São Paulo, 1992. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1992.

BERRI, G. J.; BERTOSSA, G. I. The influence of the tropical and subtropical Atlantic and Pacific Oceans on precipitation variability over Southern Central South America on seasonal time scales. **International Journal of Climatology**, v. 24, n. 4, p. 415-435, 2004.

BEST, M. J. Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 114, n. 1, p. 91-109, 2005.

BEST, M. J.; GRIMMOND, C. S. B.; VILLANI, M. G. Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 118, n. 3, p. 503-525, 2006.

BEST, M. J.; PRYOR, M.; CLARK, D. B.; ROONEY, G. G., ESSERY, R.; MÉNARD, C. B.; MERCADO, L. M. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description–Part 1: energy and water fluxes. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 677-699, 2011.

BLOOMER, B. J.; STEHR, J. W.; PIETY, C. A.; SALAWITCH, R. J.; DICKERSON, R. R.. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 9, 2009.

BUENO, B.; P., G.; NORFORD, L. K.; ZIBOUCHE, K. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. **Geosci. Model Dev.**, v. 5, p. 433-448, 2012.

- BRAGA, A. L.; SALDIVA, P. H.; PEREIRA, L. A.; MENEZES, J. J.; CONCEIÇÃO, G. M.; LIN, C. A.; DOCKERY, D. W. Health effects of air pollution exposure on children and adolescents in São Paulo, Brazil. **Pediatric pulmonology**, v. 31, n. 2, p. 106-113, 2001.
- CAMALIER, L.; COX, W. DOLWICK, P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 33, p. 7127-7137, 2007.
- CAMILLONI, I.; BARRUCAND, M. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. **Int. J. Climatol.** v.31, p. 1222 – 1239, 2011.
- CARVALHO, V. S. B.; CAVALCANTI, P.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. Avaliação da Concentração do Ozônio e de seus precursores na RMRJ e correlação deste com variáveis meteorológicas durante o ano de 2002. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2004.
- CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.. MARTINS, J. A.; MAZZOLI, C. R.; DE FÁTIMA ANDRADE, M. Air quality status and trends over the metropolitan area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 68-79, 2015.
- CATTELL, R. B. **Factor analysis**. New York: Harper and Row, 1952.
- CATTELL, R. B. **The scientific use of factor analysis**: in behavioral and life sciences. New York and London: Plenum Press, 1978.
- CAZES-BOEZIO, G.; ROBERTSON, A.; MECHOSO, C. R. Seasonal dependence of ENSO teleconnections over South America and relationships with precipitation in Uruguay. **Journal of Climate**, v. 16, n. 8, p. 1159-1176, 2003.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB).
Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2013 – São Paulo, 2014.

CLARK, D. B.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; JONES, C. D.; GEDNEY, N.; BEST, M. J.; BOUCHER, O. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description–Part 2: carbon fluxes and vegetation dynamics. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 701-722, 2011.

CHARABI, Y.; AL-YAHYAI, S. Integral assessment of air pollution dispersion regimes in the main industrialized and urban areas in Oman. **Arab J Geosci.** V.4, p.625– 634, 2011.

CHEN, F.; KUSAKA, H.; TEWARI, M.; et al. Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area. In: SYMPOSIUM ON THE URBAN ENVIRONMENT, 5., 2004, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: AMS, 2004. p. 9-11.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, **Energy Build.** v.33, p.319–331, 2001.

COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3-4, p. 185-197, 2002.

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A.; CANZIANI, P. O. The spatial and temporal behaviour of the lower stratospheric temperature over the Southern Hemisphere: the MSU view. Part I: data, methodology and temporal behaviour. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 4, p. 419-437, 2001

COTTON, et al. RAMS 2001: Current Status and Future Directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, pp. 5-29, 2003

COX, P. M.; BETTS, R. A.; BUNTON, C. B.; ESSERY, R. L. H.; ROWNTREE, P. R.; SMITH, J. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. **Climate Dynamics**, v. 15, n. 3, p. 183-203, 1999.

- DAUMAS, R. P.; MENDONÇA, G. A.; LEÓN, A. P. D. Poluição do ar e mortalidade em idosos no Município do Rio de Janeiro: análise de série temporal. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 20, n. 1, p. 311-319, 2004.
- DE OLIVEIRA, V.; FERREIRA, A. P. Poluição do ar e saúde ambiental na cidade do Rio de Janeiro: contribuição para a definição de estratégias de monitoramento. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 1, n. 1, 2007.
- DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1998.
- DIAS, M. A. S.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M.; FREITAS, E. D.; DIAS., P. L. S. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, n. 3-4, p. 705-722, 2013.
- DUNCAN, D. B. Multiple range and multiple F tests. **Biometrics**, v. 11, n. 1, p. 1-42, 1955.
- DURAN, B. S.; ODELL, P. L. Lecture notes in economics and mathematical systems. **Cluster Analysis: A Survey**, v. 100, 1974.
- ERELL, E.; WILLIAMSON, T. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. **Int. J. Climatol.** v. 27, p. 1243 – 1255. 2007.
- ESSERY, R. L. H.; BEST, M. J.; BETTS, R. A.; COX, P. M.; TAYLOR, C. M. Explicit Representation of Subgrid Heterogeneity in a GCM Land Surface Scheme. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 3, p. 530-543, 2003.
- EVERITT, B.S. **Cluster analysis**. Heinemann Educational Books, London: Academic Press, 1993.

FALLMANN J.; FORKEL R.; GRELL G. Urban heat island versus air quality –a numerical modelling study for a european city. In: ANNUAL FALL MEETING OF THE AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 2014, San Francisco, CA. **Poster...** December 15 2014.

FERREIRA, M. J.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 104, n. 1-2, p. 43-56, 2011.

FERREIRA, M. J.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; CODATO, G.; BÁRBARO, E. W.; ESCOBEDO, J. F. Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. **Theoretical and applied climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 229-246, 2012.

FERREIRA, M. J.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.. Diurnal variation in stored energy flux in São Paulo city, Brazil. **Urban Climate**, v. 5, p. 36-51, 2013.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1 : Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 188-207, 2009.

FREITAS, S. R. et al. PREP-CHEM-SRC-1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 419-433, 2011.

FREITAS, S. R. et al. **The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.0):** a Brazilian effort to

develop an integrated environmental model tuned for tropical and sub-tropical areas, 2016 (em preparação)

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua Influência sobre a dispersão de poluentes**. 2003. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L.; FREITAS, S. R.. Simulações da concentração de monóxido de carbono sob efeito da brisa marítima/terrestre em São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza-CE. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2004.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L. Interactions of urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo – Brazil. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007.

FUJIBE, F. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. **Int. J. Climatol**. v. 29, p. 1811 – 1822, 2009.

GESCH, D. B.; VERDIN, K. L.; GREENLEE, S. K. New land surface digital elevation model covers the Earth. **Eos Trans**. AGU, 1999. v. 80. n. 6. p. 69-70.

GONÇALVES, F. L. T.; SILVA DIAS, P. L.; ARAÚJO, G. P. Climatological analysis of wintertime extreme low temperatures in São Paulo City, Brazil: impact of sea-surface temperature anomalies. **International journal of climatology**, v. 22, n. 12, p. 1511-1526, 2002.

GOUVEIA, N. et al. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2003.

GOUVEIA, N.; BREMNER, S. A.; NOVAES, H. M. D. Association between ambient air pollution and birth weight in São Paulo, Brazil. **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 58, n. 1, p. 11-17, 2004.

GOUVEIA, N.; FREITAS, C. U. D.; MARTINS, L. C.; MARCILIO, I. O. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. **Cad Saúde Pública**, v. 22, n. 12, p. 2669-77, 2006.

GOUVÊA, M. L.; SAAD, S. I. ; FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L.; CAMARGO, R., Estudo de caso: tempestade envolvendo interação entre a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana em 01/03/99. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis – SC. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

GOUVÊA, M. L. **Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GREEN P. **Analysing multivariate data**. Illinois: The Dryden Press, 1978.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J.. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

- HANNACHI, A.; JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 9, p. 1119-1152, 2007.
- HARMAN, H. H. **Modern factor analysis**. University of Chicago Press, 1976.
- HARMAN, I. N.; BEST, M. J.; BELCHER, S. E. Radiative exchange in an urban street canyon. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, n. 2, p. 301-316, 2004a.
- HARMAN, I. N.; BARLOW, J. F.; BELCHER, S. E. Scalar fluxes from urban street canyons part II: model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 113, n. 3, p. 387-410, 2004b.
- HARMAN, I. N.; BELCHER, S. E. The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, n. 621, p. 2749-2768, 2006.
- HART, M. A.; SAILOR, D. J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. **Theor Appl Climatol**, v. 95, p.397–406, 2009.
- HE, H.; HEMBECK, L.; HOSLEY, K. M.; CANTY, T. P.; SALAWITCH, R. J.; DICKERSON, R. R. High ozone concentrations on hot days: The role of electric power demand and NO_x emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 19, p. 5291-5294, 2013.
- HICKS, B. B; CALLAHAN, W. J, HOEKZEMA, M. A. On the Heat Islands of Washington, DC, and New York City, NY. **Boundary-Layer Meteorol**, v.135, p.291–300, 2010.
- HIDALGO, J. et al. Advances in urban climate modeling. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1146, n. 1, p. 354-374, 2008.

HOUET, T.; PIGEON, G. Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors—an application on Toulouse urban area (France). **Environmental pollution**, v. 159, n. 8, p. 2180-2192, 2011.

IGNOTTI, E. et al. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista de saude publica**, v. 44, n. 1, p. 121-130, 2010.

JACOB, D. J.; LOGAN, J. A.; GARDNER, G. M.; YEVICH, R. M.; SPIVAKOVSKY, C. M.; WOFSY, S. C.; SILLMAN, S.; PRATHER, M. J.. Factors regulating ozone over the United States and its export to the global atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D8, 1993.

JACOB, D.J. Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone. **Atmospheric Environment**, v. 34, 2131-2159, 2000.

JOHANSSON, E.; SPANGENBERG, J.; GOUVÊA, M. L.; FREITAS, E.D. Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. **Urban Climate**, v. 6, p. 24-43, 2013.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

KARAM, H. A.; PEREIRA FILHO, A. J.; MASSON, V.; NOILHAN, J.; MARQUES FILHO, E. P. Formulation of a tropical Town Energy Budget (t-TEB) scheme. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, p. 109-120, 2010.

KIM, YEON-HEE; BAIK, JONG-JIN. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 5, p. 591-605, 2005.

KOLOKOTRONI, M.; REN, X.; DAVIES, M.; MAVROGANNI, A. London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings. **Energy Buildings**, v. 47, p.302–311, 2012.

- LAI, L. -W.; CHENG, W. -L. Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. **Science of the Total Environment**, v. 407, p.2724-2733, 2009
- LANDSBERG, HELMUT E. **The urban climate**. Academic press, 1981.
- LEMONSU, A.; BASTIN, S.; MASSON, V.; DROBINSK, P. Vertical structure of the Urban Boundary Layer over Marseille under sea-breeze conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v.118, p. 477–501, 2006.
- LENZI, E.; FAVERO, L. O. B. **Introdução à química da atmosfera: ciência, vida e sobrevivência**. Grupo Gen-LTC, 2000.
- LOMBARDO, M. A. A Ilha de calor da metrópole paulistana: subsídio ao planejamento urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 3., 1984, Belo Horizonte - MG. **Anais...** Rio de Janeiro: 1984.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O. et al. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 13, p. 5785-5795, 2010.
- LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction**. Cambridge, MA: Statistical Forecasting Project, M.I.T., 1956. 48 p. (Sci. Rep. No. 1).
- LIN, C. A; PEREIRA, L.A.A; BRAGA, A.L.F; CONCEIÇÃO, G.M.S; KISHI, H.S; MILANI, R. Association between air pollution and ischemic cardiovascular emergency room visits. **Environmental Research**; v. 92, n. 1, 53-63, 2003.
- LUCENA, A. J. **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. 357 f. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil do Instituto Alberto Luiz Coimbra de

Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

LUCENA, A. J.; ROTUNNO FILHO, O. C.; DE ALMEIDA FRANÇA, J. R.; DE FARIA PERES, L.; XAVIER, L. N. R. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical and applied climatology**, v. 111, n. 3-4, p. 497-511, 2013.

LYRA, G. B.; ODA-SOUZA, M.; VIOLA, D. N. Modelos lineares aplicados à estimativa da concentração do material particulado (PM10) na cidade do Rio de Janeiro, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 392-400, 2011.

MACDONALD, R. W.; GRIFFITHS, R. F.; HALL, D. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. **Atmos. Environ.**, 32, 1857–1864, 1998.

MARCIOTTO, E. R.; OLIVEIRA, A. P.; HANNA, S. R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2497-2505, 2010.

MARQUES FILHO, E. P. M.; KARAM, H. A.; MIRANDA, A. G.; FRANÇA, J. R. A. Rio de Janeiro's tropical urban climate. **Quarterly News Letter of the International Association for Urban Climate**, p. 5-9, 2009.

MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 104, p. 261–304, 2002.

MARTILLI, A. A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment. **Boundary Layer Meteorology**. v.108, p. 91 – 119, 2003.

MARTINS, D. K.; STAUFFER, R. M.; THOMPSON, A. M.; KNEPP, T. N.; PIPPIN, M. Surface ozone at a coastal suburban site in 2009 and 2010:

- Relationships to chemical and meteorological processes, **J. Geophys. Res.**, 117, 2012.
- MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 357-397, 2000.
- MASSON, V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, p. 35–45, 2006.
- MEMON, R. A.; LEUNG, D. Y.C.; LIU, CHUN-HO. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. **Atmospheric Research**, v. 94, n. 3, p. 491-500, 2009.
- MICKLEY, L. J.; JACOB, D. J.; FIELD, B. D.; RIND, D. Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 24, 2004.
- MIRZAEI, P. A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2192-2201, 2010.
- MONTÁVEZ, J. P.; RODRÍGUEZ, A.; JIMÉNEZ, J. I. A Study of the urban heat Island of Granada. **International Journal of Climatology**, v.20, p. 899–911, 2000.
- MORAES, N. O. **Modelagem do mecanismo de formação e desintensificação de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- MORAIS, M. V. B.; DE OLIVEIRA, A. P.; FERREIRA, M. J. Estudo numérico do balanço de radiação na superfície: Variação diurna e anual do albedo na cidade de São Paulo. **Ciencia & Natura**, p. 297-300, 2009.

MOREIRA, D. S. et al. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1. 0): applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 4, p. 1243-1259, 2013.

MOREIRA, D. S. **Simulação numérica do ciclo do carbono**. 2013. 239 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/11.25.22.57-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3F9TQN2>>. Acesso em: 23 mar. 2016. MURPHY, D. J.; HALL, M. H.; HALL, C. A. S.; HEISLER, G. M.; STEHMAN, S. V.; ANSEMI-MOLINA, C. The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico. **Int. J. Climatol.** v.31, p.1222 – 1239, 2011.

NUNES, L. H. Seasonal changes in the rainfall pattern in São Paulo State, Brazil. In: INTERNATIONAL FORUM ON CLIMATE PREDICTION, AGRICULTURE AND DEVELOPMENT, 2000, Palisades, USA. **Abstracts...** Palisades, 2000. p. 15-6.

NIELSEN-GAMMON, J. W. The Houston heat pump: modulation of a land-sea breeze by an urban heat island. In: JOINT CONF. ON THE APPLICATIONS OF AIR POLLUTION METEOROLOGY WITH THE A&WMA, 11., 2000, Long Beach, CA. **Proceedings...** Long Beach: Amer. Meteor. Soc. 2000. p. 65-69.

OGASHAWARA, I.; BASTOS, V. A Quantitative Approach for Analyzing the Relationship between Urban Heat Islands and Land Cover. **Remote Sensing**, v. 4, p. 3596-3618, 2012.

OKE, T. R. City Size and the Urban Heat Island. **Atmospheric Environment**, v.7, p. 769-779. 1973.

- OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London, England: Methuen, 1987. 435 p.
- OLIVEIRA, A.P.; SILVA DIAS, P. L. Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2., 1982, Pelotas, RS. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 1982. p129-145.
- OLIVEIRA, A.P; BORNSTEIN, R.D., SOARES, J. Annual and Diurnal Wind Patterns in the City of São Paulo. **Water, Air & Soil Pollution. Focus 3**, p. 3–15, 2003.
- OLIVEIRA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, A. J.; SOARES, J. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3-4, p. 231-249, 2002.
- OLIVEIRA, A. F. G. Testes estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**, v. 5, n. 6, p. 777-788, 2008.
- OLSON, J. S. Global ecosystem framework-definitions. **USGS EROS Data Center Internal Report, Sioux Falls, SD**, v. 37, p. 1994, 1994.
- OZDEMIR, H.; UNAL, A.; KINDAP, T.; TURUNCOGLU, U. U.; DURMUSOGLU, Z. O.; KHAN, M.; KARACA, M. Quantification of the urban heat island under a changing climate over Anatolian Peninsula. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1-2, p. 31-38, 2012.
- PAPANASTASIOUA, D. K.; MELAS, D. Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment. **Int. J. Climatol.** v.29, p. 305 – 315, 2009.

- PEREIRA FILHO, AUGUSTO J. Summer convection in urban environments and the flash floods. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 72, n. 2, p. 289-290, 2000.
- PIELKE, et al. A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p. 69-91, 1992.
- PIRES, D. O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- PORSON, A.; HARMAN, I. N.; BOHNENSTENGEL, S. I.; BELCHER, S. E. How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area? **Boundary-layer meteorology**, v. 132, n. 1, p. 107-128, 2009.
- PORSON, A.; CLARK, P. A.; HARMAN, I. N.; BEST, M. J.; BELCHER, S. E. Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: description and idealized simulations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 136, n. 651, p. 1514-1529, 2010a.
- PORSON, A.; CLARK, P. A.; HARMAN, I. N.; BEST, M. J.; BELCHER, S. E. Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: Description and idealized simulations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 136, n. 651, p. 1514-1529, 2010b.
- PREISENDORFER, R. W. **Principal component analysis in meteorology and oceanography**. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- RICHMAN, M. B.; GONG, X. Relationships between the definition of the hyperplane width to the fidelity of principal component loading patterns. **Journal of Climate**, v. 12, n. 6, p. 1557-1576, 1999.
- RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of climatology**, v. 6, n. 3, p. 293-335, 1986.

RIZWAN, A. et al. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 1, p. 120-128, 2008.

RYU, Y.-H.; BAIK, J.-J.; KWAK, K.-H.; KIM, S.; MOON, N. Impacts of urban land-surface forcing on air quality in the Seoul metropolitan area. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, 12, 25791-25832, 2012

RYAN, W. F. et al. Pollutant transport during a regional O₃ episode in the mid-Atlantic states. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 48, n. 9, p. 786-797, 1998.

ROSENZWEIG, C.; SOLECKI, W.; SLOSBERG, R. **Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces**. New York: A report to the New York State Energy Research and Development Authority, 2006.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1859-1873, 2007.

SAILOR, D. J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. **Int. J. Climatol.** v.31, p.189 – 199, 2011.

SALLES, M. A.; CANZIANI, P. O.; COMPAGNUCCI, R. H. The Spatial and Temporal Behaviour of the Lower Stratospheric Temperature over the Southern Hemisphere: The MSU View. Part II: Spatial Behaviour stratosphere; temperature; variability; MSU. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 4, p. 439-454, 2001.

SARRAT, C.; LEMONSU, A.; MASSON, V.; GUEDALIA, D. Impact of Urban Heat Island on Regional Atmospheric Pollution. **Atmospheric Environment**; v. 40, p. 1743-58, 2006.

SANTAMOURIS, M. **Energy and climate in the urban built environment**. Routledge, 2013.

SILVA, H. S. **Estudo da circulação associada a uma ilha de calor urbana com um modelo de simulação da brisa marítima**. São Paulo, 1986. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo. Instituto Astronômico e Geofísico, 1986.

SILVA, F. B. **Estudo de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro: aspectos das circulações locais com utilização do modelo atmosférico BRAMS**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SIMMONS, A. J. et al. Estimating low-frequency variability and trends in atmospheric temperature using ERA-Interim. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 140, n. 679, p. 329-353, 2014.

SINGH, R. B.; SLOAN, J. J. A high-resolution NO_x emission factor model for North American motor vehicles. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 27, p. 5214-5223, 2006.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern Oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 7, p. 1056-1066, 2010.

SOUSA, C. et al. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Ceres**, v. 59, n. 3, 2015.

SUN, CHEN-YI et al. Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, n. 3-4, p. 323-335, 2009.

SVENSSON, M. K. Sky view factor analysis—implications for urban air temperature differences. **Meteorological applications**, v. 11, n. 03, p. 201-211, 2004.

TRENBERTH, K. E. The definition of el nino. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

- UNITED NATIONS. **World population prospects: the 2011 revision.** New York, USA: United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations Secretariat, 2011. 33 p.
- VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21-26, 2010.
- VICINI, L.; SOUZA, A. M.. **Análise multivariada da teoria à prática.** Santa Maria: UFSM, CCNE, 2005.
- VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote sensing of environment**, v. 86, n. 3, p. 370-384, 2003.
- VUKOVICH, F. M. et al. Observations and simulations of the diurnal variation of the urban heat island circulation and associated variations of the ozone distribution: a case study. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, n. 7, p. 836-854, 1979.
- WALKO, R. L. et al. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 931-944, 2000.
- WARD JR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American statistical association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences.** Academic Press, 2006.
- XAVIER, T. M. B. S.; SILVA DIAS, M. A.; XAVIER, A. F. S. Impact of Enso episodes on the autumn rainfall patterns near Sao Paulo, Brazil. **International journal of climatology**, v. 15, n. 5, p. 571-584, 1995.

YANG, Z. L.; DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; PITMAN, A. J. Preliminary study of spin-up processes in land surface models with the first stage data of Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes Phase 1(a). **J. Geophys. Res.**, v. 100. n. D8. p. 16553-16578, 1995.

YOSHIKADO, H. High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, p. 1804-1813, 1996.

APÊNDICE A

Análise de Forçantes Remotas na ICU

A.1 Introdução

Na América do Sul, a expansão urbana caracterizada pelo rápido crescimento populacional combinado com a falta de planejamento urbano e infraestrutura causam sérios problemas ambientais (ALONSO et al., 2010). Entre esses problemas, destacam-se o aumento da poluição urbana e o agravamento da ICU.

Em grande escala, as relações entre os padrões da temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos Atlântico e Pacífico e a variabilidade das condições atmosféricas na América do Sul têm sido amplamente demonstrada em muitos estudos (DIAZ et al., 1998; COELHO et al., 2002). Dentre estes, alguns analisaram o impacto do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) nas flutuações sazonais da precipitação e da temperatura do ar em diferentes regiões da América do Sul, incluindo a região Sudeste do Brasil (XAVIER et al., 1995; BARROS et al., 2002; GONÇALVES et al., 2002; GRIMM, 2003; SILVAS DIAS et al., 2013). Têm-se demonstrado que o fenômeno ENOS tem um forte impacto sobre o padrão de precipitação, devido aos efeitos de advecção quente relacionado com a circulação regional, enquanto que os efeitos sobre o padrão de temperatura do ar próximo a superfície são relativamente mais fracos (BARROS et al., 2002). O que justifica a grande quantidade de estudos que exploram os impactos do fenômeno ENOS sobre o regime de precipitação no Brasil.

No entanto, ainda parecem questionáveis quais os possíveis fatores remotos, além das componentes locais, que podem influenciar a temperatura do ar, especificamente, nas regiões urbanas e, assim, induzir alterações no padrão de variabilidade temporal da ilha de calor nas cidades da América do Sul. A falta de estudos disponíveis na literatura que demonstram os potenciais impactos da TSM sobre o fenômeno da

Ilha de calor, especialmente nas cidades da América do Sul, motivou ainda mais a exploração desse conteúdo.

O principal objetivo deste capítulo foi investigar a existência de relações entre os padrões de TSM dos Oceanos Atlântico Sul e Pacífico Equatorial e a temperatura do ar nas áreas urbanas da América do Sul. Mais especificamente, pretende-se evidenciar a existência de teleconexões entre essas regiões oceânicas e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com o objetivo de avaliar a ocorrência de efeitos remotos sobre a variabilidade temporal da temperatura média urbana local e determinar a relação de intensificação ou atenuação do fenômeno ICU. Portanto, nesse capítulo a principal hipótese a ser questionada é se forçantes remotas podem influenciar a ocorrência do fenômeno da ilha de calor urbana nas duas maiores megacidades do Brasil.

A.2 Material

A.2.1 Descrição das áreas de estudo

Esta abordagem concentrou-se nos dois mais populosos e maiores conglomerados urbanos da América do Sul, ambos localizados no Sudeste do Brasil: a RMRJ e a RMSP (Figura A.1). A RMRJ é composta por 21 municípios, limitando-se a leste e a oeste pelas baías da Guanabara e Sepetiba, respectivamente, a norte pela Serra da Mantiqueira e ao sul pelo Oceano Atlântico. A RMSP é composta por 39 municípios e está contida entre as montanhas da Cantareira e da Serra do Mar.

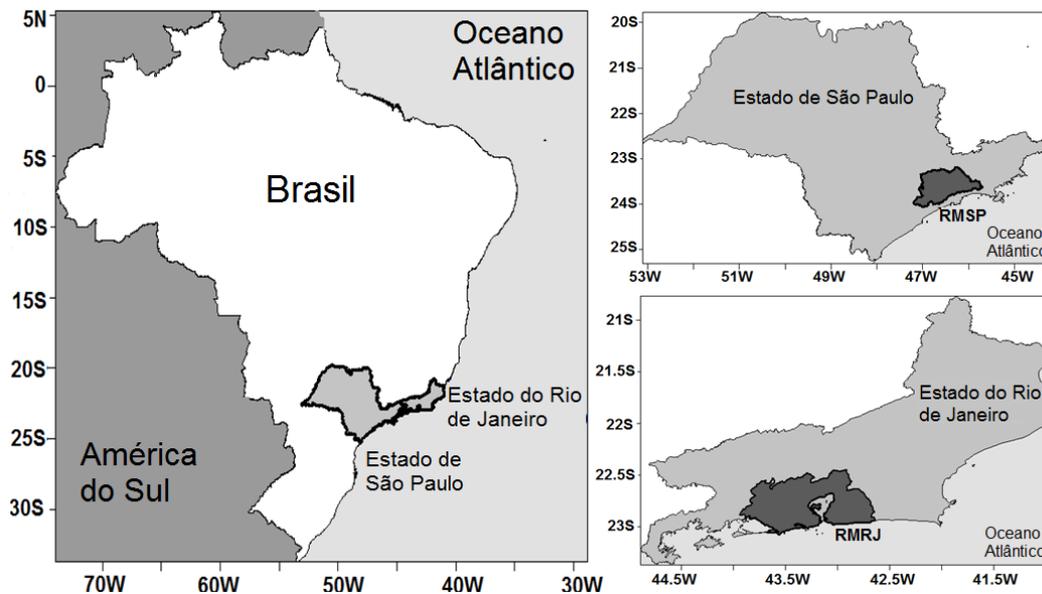


Figura A.1 - À esquerda, localização geográfica do estado do Rio de Janeiro e do estado de São Paulo. À direita, superior e inferior, localização da RMSP e da RMRJ, respectivamente.

Para as áreas oceânicas foram consideradas duas regiões distintas, a região do Oceano Atlântico Sul ao longo da costa da região Sudeste do Brasil, delimitada por 30°S - $23,5^{\circ}\text{S}$ e 45°W - 20°W , portanto, uma área marítima que banha os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, e a região do Oceano Pacífico Equatorial correspondente a área do Niño 3.4, delimitando-se por 5°N - 5°S e 170°W - 120°W . Essas duas áreas oceânicas foram adotadas para representar a forçante local e a forçante remota, respectivamente (Figura A.2).

Nesse estudo, a região do Niño 3.4 foi adotada para representar a ocorrência do fenômeno ENOS em vez das outras áreas de classificação, como Niño 1+2, Niño 3 e Niño 4, por se tratar de uma região em que há as mais intensas manifestações do El Niño durante sua fase madura em Dez-Jan-Fev. Além disso, segundo definições da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e de estudos como Trenberth (1997), a ocorrência de El Niño é dada se em 5 meses consecutivos a anomalia média da TSM na região do Niño 3.4 exceder $0,4^{\circ}\text{C}$ durante 6 meses ou mais.

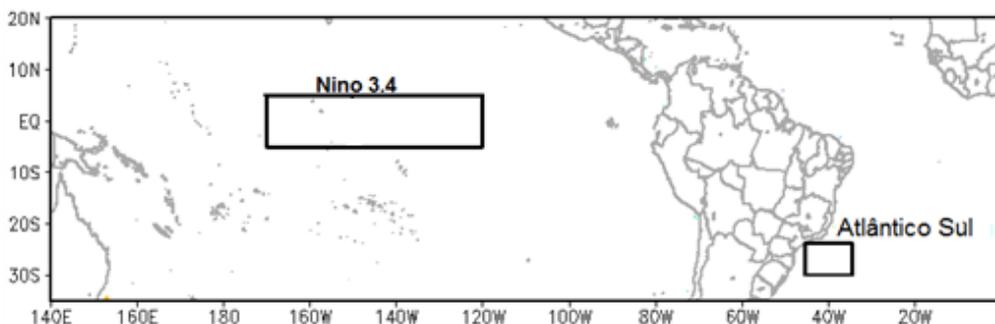


Figura A.2 - Delimitação das áreas oceânicas do Atlântico Sul ao longo da costa da região Sudeste do Brasil e do Pacífico Equatorial correspondente da área do Niño 3.4.

A.2.2 Base de dados

A base de dados analisada compreende 10 anos de observações de temperatura do ar horária a partir de estações meteorológicas de superfície na RMRJ e RMSF entre o período de 2002 e 2011, um total de aproximadamente 87.600 dados horários por estação. Os conjuntos de dados da RMRJ e da RMSF compreendem 1.226.400 e 788.400 dados horários, respectivamente, em que cerca de 435.824 (35%) e 244.304 (31%) são dados faltosos. Como o número de dados faltantes quando comparado com o número total, não quantifica valores significativos, nenhum método estatístico foi utilizado para preencher as lacunas no conjunto de dados.

Um número total de 14 estações da RMRJ foram usadas (Figura A.3), incluindo estações convencionais de aeródromos (Código METAR) e estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Na RMSF, 9 estações foram usadas (Figura A.3), incluindo estações convencionais de aeródromos e estações automáticas de responsabilidade da Universidade de São Paulo (USP) e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do governo do estado de São Paulo.

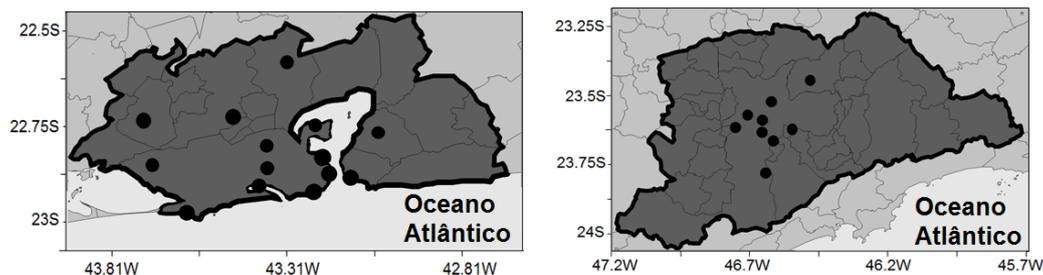


Figura A.3 - A localização das estações meteorológicas é apresentada para ambas as áreas: RMRJ (esquerda) e RMSP (à direita).

Os dados de TSM das regiões oceânicas de estudo foram obtidos a partir das reanálises do ERA-INTERIM da *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) com resolução espacial de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$. Os dados mensais da grade da TSM correspondem ao mesmo período de 10 anos de 2002-2011 semelhante aos dados meteorológicos observados.

A.3 Métodos

A análise baseou-se na avaliação dos coeficientes de correlação entre as anomalias de TSM e as anomalias de temperatura observadas na RMRJ e na RMSP. O uso de coeficientes de correlação é bastante comum em estudos de escala sinótica e planetária como, por exemplo, em análises dos impactos das forçantes remotas nas condições meteorológicas como no regime precipitação (COELHO et al., 2002; VASCONCELLOS; CAVALCANTI, 2010; entre outros).

Para evidenciar a consistência e sua significância estatística, nos dados dos coeficientes de correlação foram aplicados os testes de significância estatística *t-student* com 95% de significância.

A.4 Resultados

A.4.1 Anomalias de TSM e temperatura do ar

A distribuição sazonal para o período de 2002-2011 dos coeficientes de correlação entre as anomalias da TSM, baseadas nas reanálises ERA-INTERIM, e as anomalias da temperatura média observadas na RMRJ, com 95% de significância (teste *t-student*), está representada na Figura A.4. As anomalias da temperatura na RMRJ não mostram correlação com

anomalias da TSM associadas com o ENOS durante o verão (Figura A.4a). A área com correlação mais extensa e mais significativa entre as duas anomalias encontra-se na região do Atlântico Sul ao longo da costa Sudeste do Brasil. Este comportamento indica que não há forçante remota significativa na RMRJ associada com ENOS durante o verão e as temperaturas locais da área urbana são influenciadas pela TSM do Oceano Atlântico e por fatores locais.

Durante o outono austral as anomalias da TSM na região Niño 3.4 são consistentemente correlacionadas com as anomalias de temperatura na RMRJ (Fig A.4b.), o que significa que o padrão de TSM na região do ENOS é o principal responsável pela variabilidade da temperatura nessa região metropolitana. No entanto, de acordo com Cazes-Boezio et al. (2003), não são observadas conexões entre ENOS e a América do Sul via trem de ondas Rossby Extratropical, sugerindo que a forte correlação entre ENOS e a temperatura local da RMRJ, durante o outono, ocorre devido a anomalias na célula de Hadley. Por outro lado, verificou-se também que a variabilidade da temperatura na RMRJ também está relacionada com a TSM na costa da região Sudeste; no entanto, esta é uma região menor e de mais fraca influência quando comparada com as outras estações do ano.

O padrão de correlação durante o inverno se assemelha ao do verão. A anomalia da temperatura do ar na RMRJ também se correlaciona com a TSM do Atlântico Sul e praticamente não há correlação com a TSM da área de Niño 3.4 (Figura A.4c).

A primavera é a estação do ano com correlação mais significativa entre as anomalias da temperatura na RMRJ e as anomalias da TSM associadas ao ENOS (Figura A.4d), evidenciando possíveis teleconexões da RMRJ com o Oceano Pacífico Equatorial. Esse resultado corrobora aos encontrados em Grimm (2003) e Cazes-Boezio et al. (2003), que identificaram que os impactos do ENOS na América do Sul são principalmente significativos durante a primavera. Simultaneamente, altos valores de correlação também são observados próximo à região oceânica

do Atlântico Sul, mostrando que as anomalias de ambas as áreas oceânicas desempenham papéis importantes na variabilidade da temperatura na RMRJ nesta estação.

Dessa forma, os resultados indicam que, durante as estações de transição, primavera e outono, o sinal de teleconexões entre a temperatura da RMRJ e a região do ENOS é mais evidente. Assim, valores positivos de anomalias de TSM têm uma tendência a gerar anomalias positivas de temperatura na RMRJ. Portanto, se houver um aquecimento persistente da TSM no Oceano Pacífico Equatorial (ocorrência de eventos de El Niño), haverá a tendência de aumento na temperatura na RMRJ e, possivelmente, intensificação da ICU.

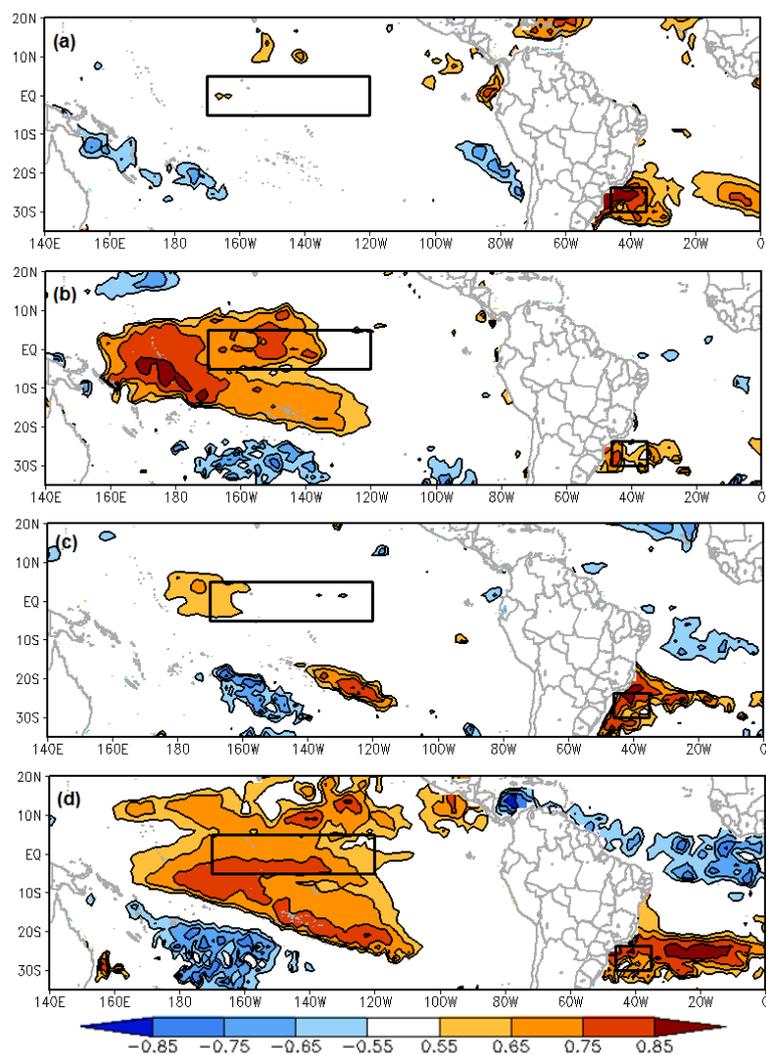


Figura A.4 - Distribuição dos coeficientes de correlação entre a anomalia de TSM e anomalia de temperatura média na RMRJ, com 95% de significância (teste *t-student*): (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

A distribuição sazonal para o mesmo período de 10 anos (2002-2011) dos coeficientes de correlação entre anomalias de TSM e anomalias de temperatura média observadas na RMSP é representada na Figura A.5. Para a RMSP, evidenciou-se em todas as estações uma correlação intensa entre a temperatura do ar e a TSM da área do Oceano Atlântico junto à costa sudeste do Brasil, uma indicação de que a RMSP é afetada principalmente pela TSM do oceano vizinho, com nenhuma ou muita fraca influência remota do ENOS. Na primavera (Figura A.5d), quando é apresentada uma correlação forte na área do Oceano Atlântico Sul, também se pode observar uma correlação, embora fraca, na área de Niño 3.4, indicando que esta é a única estação em que existe uma influência remota do ENOS sobre a temperatura na RMSP.

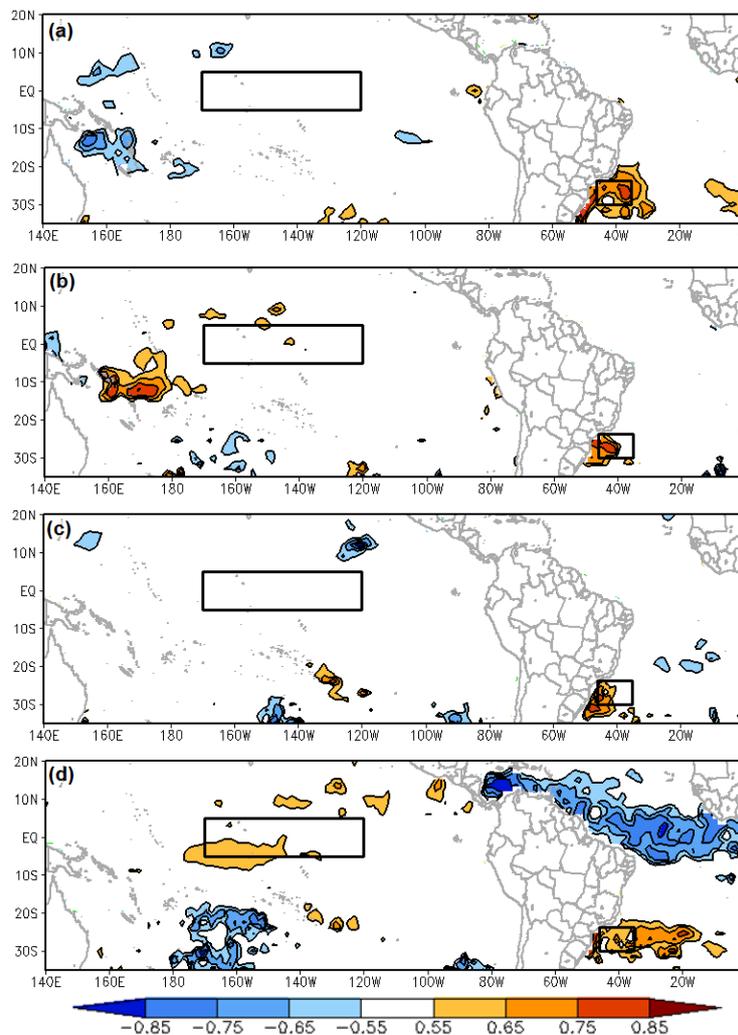


Figura A.5 - Distribuição dos coeficientes de correlação entre a anomalia de TSM e anomalia de temperatura média na RMSP, com 95% de significância (teste *t-student*): (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

As séries temporais das anomalias sazonais de temperatura de 2002 a 2011 para todas as estações do ano foram utilizadas para avaliar a variação anual da temperatura e, portanto, identificar associações com as fases do ENOS (Figura A.6 e A.7). Durante o verão e o inverno, nenhuma correlação estatisticamente significativa foi observada entre a TSM da área do Niño 3.4 e as anomalias de temperatura na RMRJ. Enquanto que, para a RMSP, não foi observada correlação estatística no verão, outono e inverno. Estes resultados sugerem que as variações de temperaturas (aquecimento ou resfriamento) na RMRJ e RMSP durante essas estações não estão relacionadas com eventos remotos do ENOS. Portanto, durante o verão e inverno na RMRJ (Figura A.6a e Figura A.6c) e durante o verão, outono e inverno na RMSP (Figura A.7a, A.7b e A.7c), a ocorrência de anos com anomalias positivas ou negativas de temperatura são significativamente relacionadas com a TSM do Oceano Atlântico Sul, além de fatores locais determinantes, tais como a urbanização, a configuração de topografia e circulação do vento local, entre outros. Por outro lado, durante o outono e a primavera, observou-se uma influência significativa dos episódios ENOS na temperatura da RMRJ, como uma indicação de que a temperatura na RMRJ irá aumentar (ou diminuir) sob a influência de eventos de El Niño (ou La Niña). Na RMSP, apenas na primavera é observada a influência dos eventos de ENOS na temperatura, com o mesmo comportamento que a RMRJ.

Com o intuito de confirmar a relação entre os eventos ENOS e a temperatura na RMRJ durante as estações da primavera e do outono e na RMSP durante a primavera, foi utilizado o Índice de Niño Oceânico (*Oceanic Niño Index* - ONI) desenvolvido pelo *Climate Prediction Center* (CPC) do *US National Weather Service*, que identifica a ocorrência de anos com El Niño, La Niña ou Neutro para a região Niño 3.4. O índice ONI é construído sobre a média de três meses consecutivos de anomalias de TSM do banco de dados de Temperatura da Superfície do Mar reconstruída estendido (ERSST.v3b) na região Niño 3.4 para um período de 30 anos. Considerando-se um limite de +/- 0,5°C do ONI, os valores em vermelho e em azul indicam a ocorrência de anos de El Niño e La

Niña com episódios de aquecimento e resfriamento, respectivamente. Valores em preto são anos neutros. Portanto, valores positivos (negativos) de ONI são esperados quando há correlação com as anomalias positivas (negativas) de temperatura na RMRJ e RMSP.

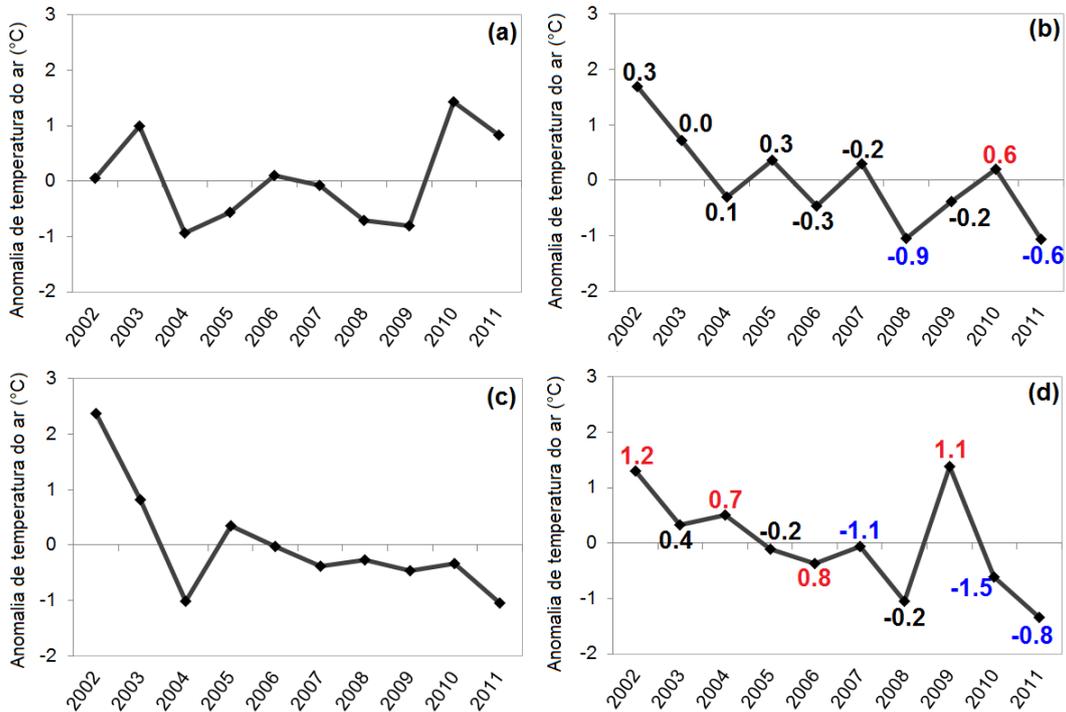


Figura A.6 - Evolução temporal da anomalia de temperatura do ar na RMRJ para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno (d) primavera. Os valores de ONI correspondem a ocorrência de eventos de El Niño (vermelho), La Niña (azul) ou neutros (preto).

Durante o outono de 2008 e 2011, as anomalias negativas são destacadas na série histórica de temperatura (Figura A.6b), simultaneamente com valores negativos de ONI (anos de La Niña). Além disso, em 2010 houve uma anomalia positiva de temperatura do ar (Figura A.6b) e valores positivos de ONI (ano de El Niño). Na primavera (Figura A.6d), nos anos de 2002, 2004 e 2009, destacam-se a ocorrência de alta anomalia positiva de temperatura e valores positivos ONI, portanto, anos de eventos de El Niño. Para os anos de 2010 e 2011, são evidenciadas anomalias negativas de temperatura e valores negativos de ONI (ocorrência de La Niña). Contudo, anos de anomalias positivas e negativas nem sempre coincide com os valores negativos e positivos de ONI, respectivamente, o que significa que nem todos os eventos ENOS

podem explicar a variabilidade interanual da temperatura do ar na RMRJ. Um exemplo oposto é a primavera de 2006, em que foi observada uma anomalia negativa de temperatura e um valor positivo de ONI. Também durante a primavera, mas em 2007, uma anomalia positiva de temperatura e um valor negativo ONI foram observados (ocorrência de La Niña). Este comportamento aparentemente contraditório indica uma competição entre a forçante local, TSM do Oceano Atlântico Sul, com a influência remota do ENOS. Na maioria das vezes, a influência do ENOS prevalece, mas ocasionalmente as forçantes locais dominam.

Para a primavera na RMSP (Figura A.7) é observado o mesmo padrão que foi encontrado na RMRJ. Os anos de 2002, 2004 e 2009 também têm anomalias positivas de temperatura e valores positivos de ONI (ocorrência de El Niño) e os anos de 2010 e 2011 com anomalias negativas de temperatura do ar e valores negativos de ONI (ocorrência de La Niña).

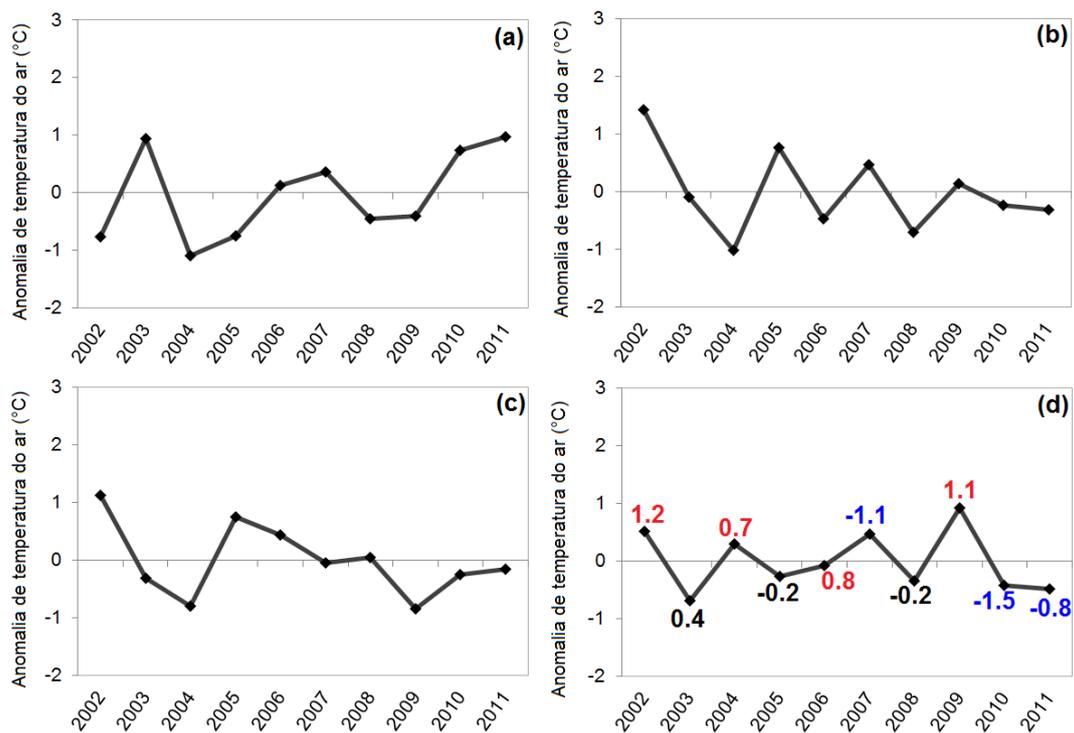


Figura A.7 - Evolução temporal da anomalia de temperatura do ar na RMSP para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno (d) primavera. Os valores de ONI correspondem a ocorrência de eventos de El Niño (vermelho), La Niña (azul) e neutro (preto).

Do mesmo modo que na RMRJ, alguns anos de anomalias negativas e positivas (2006 e 2007), nem sempre coincidem com os valores negativos e positivos de ONI. Como já foi explicada no caso da RMRJ, essa contradição no comportamento da temperatura possivelmente indica uma competição entre a forçante local e remota.

Na análise de correlação entre os valores de ONI e a temperatura do ar na RMRJ (Figura A.8) é observado o padrão descrito anteriormente. Uma clara relação é mostrada, em que os eventos de El Niño (valores positivos de ONI) estão associados a anomalias positivas de temperatura na RMRJ. O padrão associado a eventos de La Niña parecem ter um comportamento oposto; ocorrências de La Niña (valores negativos de ONI) estão associadas com anomalias negativas de temperatura na RMRJ. Em eventos neutros não é possível estabelecer padrões aparentes, são observadas tanto anomalias positivas como negativas de temperatura.

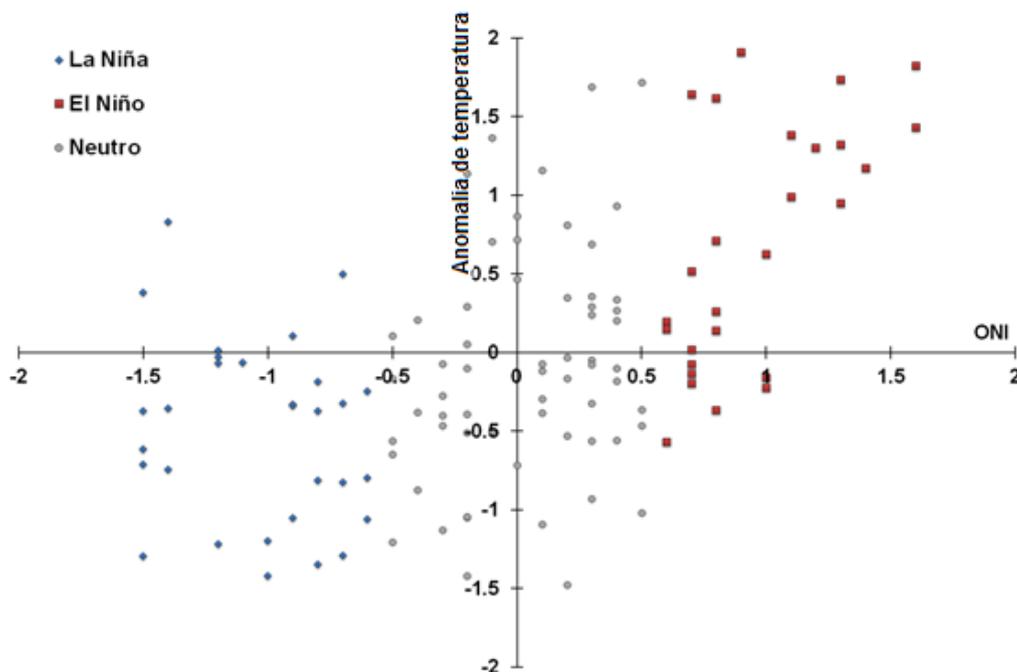


Figure A.8 - Correlação entre anomalia da temperatura do ar na RMRJ e os valores de ONI correspondentes aos anos de ocorrência de El Niño, La Niña e neutro.

Na análise de correlação entre valores de ONI e a temperatura do ar na RMSP (Figura A.9) é observada nos eventos de El Niño o mesmo padrão que foi encontrado na RMRJ. Há uma grande proporção de anomalias positivas na RMSP durante eventos de El Niño (valores positivos de ONI), enquanto que em eventos de La Niña (valores negativos de ONI) esta relação não é tão evidente como na RMRJ. É perceptível a ocorrência de anomalias negativas e positivas de temperatura com a mesma proporção de ocorrência durante eventos de La Niña. Em casos neutros, são identificadas anomalias positivas e negativas semelhante ao que foi observado na RMRJ.

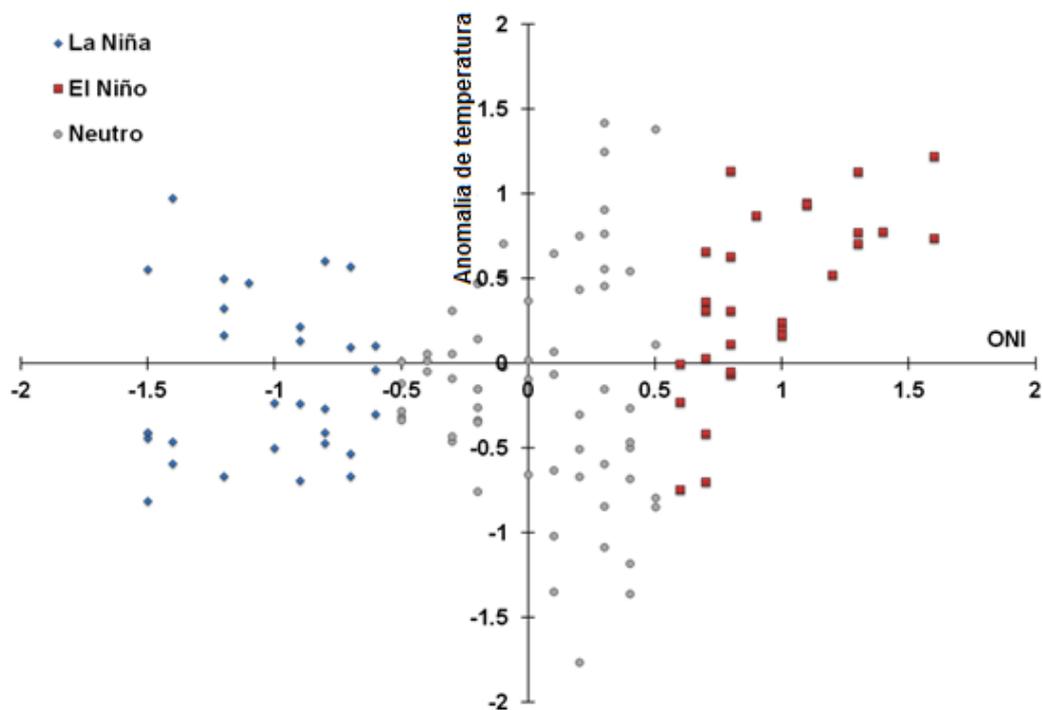


Figure A.9 - Correlação entre anomalia da temperatura do ar na RMSP e os valores de ONI correspondentes aos anos de ocorrência de El Niño, La Niña e neutro.

Para verificar se os eventos do El Niño (La Niña) estão associados com anomalias positivas (negativas) da temperatura, foram analisadas as distribuições da frequência de anomalias de temperatura na RMRJ e na RMSP durante os eventos ENOS (Figura A.10a e Figura A.10b, respectivamente). Em ambas as regiões, em eventos de La Niña observa-se que a amplitude da anomalia de temperatura é reduzida, no entanto,

na RMRJ os valores de anomalia negativos são mais baixos que da RMSP. Em eventos de El Niño, a frequência das anomalias positivas de temperatura é significativa na RMRJ e na RMSP, destacando-se a RMRJ que tem uma maior frequência de anomalias positivas de temperatura nas faixas de 1,6; 2 e maior que 2 (Figura A.10a). Em casos neutros, as anomalias positivas e negativas de temperatura ocorrem em média com a mesma frequência tanto para a RMRJ como para RMSP. Portanto, com esta análise, pode ser visto que o impacto de ENOS na anomalia de temperatura da RMRJ é ligeiramente mais significativo do que na RMSP.

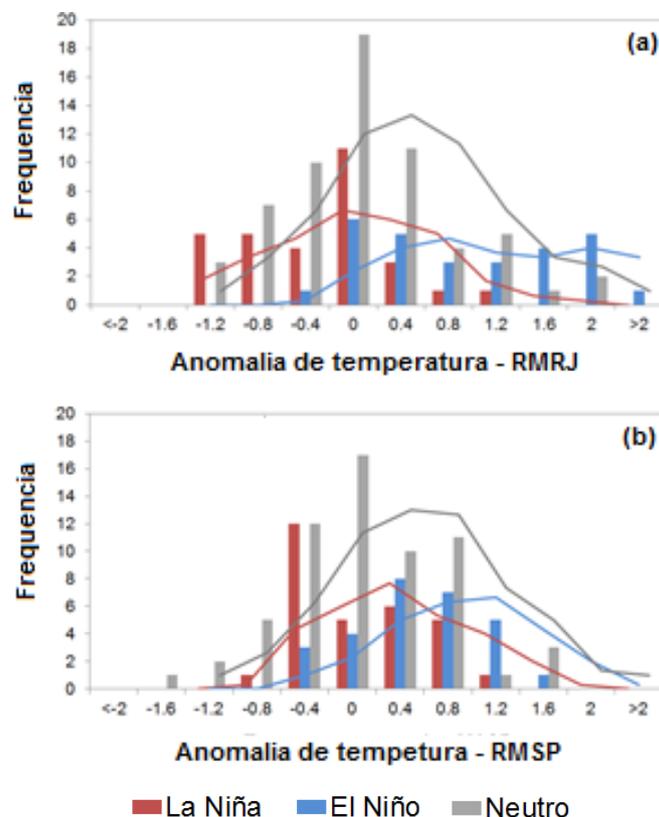


Figura A.10 - Histograma da anomalia de temperatura da (a) RMRJ e da (b) RMSP correspondente para anos de ocorrência de El Niño, La Niña e neutro.

As duas regiões metropolitanas no Sudeste do Brasil, separadas somente por 357,65 km, reagem muito diferentemente aos eventos de ENOS com respeito à temperatura urbana local. Apesar desta proximidade, fica claro que a forçante remota causada pelo ENOS dificilmente influencia a temperatura do ar na RMSP, uma vez que foram encontradas correlações estatísticas significativamente baixas ou praticamente nenhuma. Estudos anteriores como Berri e Bertosa (2004) e Soler et al. (2010) já haviam

demonstrado que ENOS pode gerar impactos distintos em regiões próximas. Neste caso, os impactos opostos do ENOS na RMRJ e na RMSP estão relacionados com o posicionamento da região em relação à circulação regional. Vários estudos (XAVIER et al., 1995; GRIMM et al., 1998; NUNES, 2000; GONÇALVES et al., 2002; COELHO et al., 2002) apontaram que a região Sudeste do Brasil, especificamente o estado de São Paulo, está localizado em uma faixa de transição de condições mais quente (NE do Brasil) para mais úmido (Sul do Brasil), causando assim diferentes impactos do ENOS em seu extremos.

A.4.2 Anomalia de TSM e intensidade da ilha de calor urbana

Depois de ter sido observado que a temperatura do ar na RMRJ apresenta correlação significativa com a TSM do Atlântico Sul e a TSM da região do Niño 3.4, avaliou-se a correlação da TSM das mesmas áreas oceânicas com a intensidade da ilha de calor urbana (IICU). Esta análise foi realizada apenas para RMRJ uma vez que os resultados anteriores demonstraram que os impactos remotos do ENOS influenciam mais significativamente o Rio de Janeiro do que São Paulo.

A IICU é definida como a diferença de temperatura do ar entre as áreas urbana/suburbana e rural/vegetação. Para determinar a IICU foram escolhidas estações meteorológicas da RMRJ entre as estações apresentadas na Figura A.3. As estações utilizadas foram às estações de Ecologia, Xerém e Santa Cruz (que correspondem à área rural) e a estação Central (correspondente à área urbana). A temperatura da área rural foi determinada pela média aritmética da temperatura do ar das três estações que representam a referida área. Portanto, a IICU é determinada pela equação, $IICU: T_{urbano} - T_{rural}$.

Dessa forma, a correlação foi feita entre as anomalias de TSM dos Oceanos Pacífico Tropical e Atlântico Sul e os valores de IICU observados na RMRJ. A distribuição sazonal para o período de 2002-2011 dos coeficientes de correlação com 95% de significância (teste *t-student*) é representada na Figura A.11.

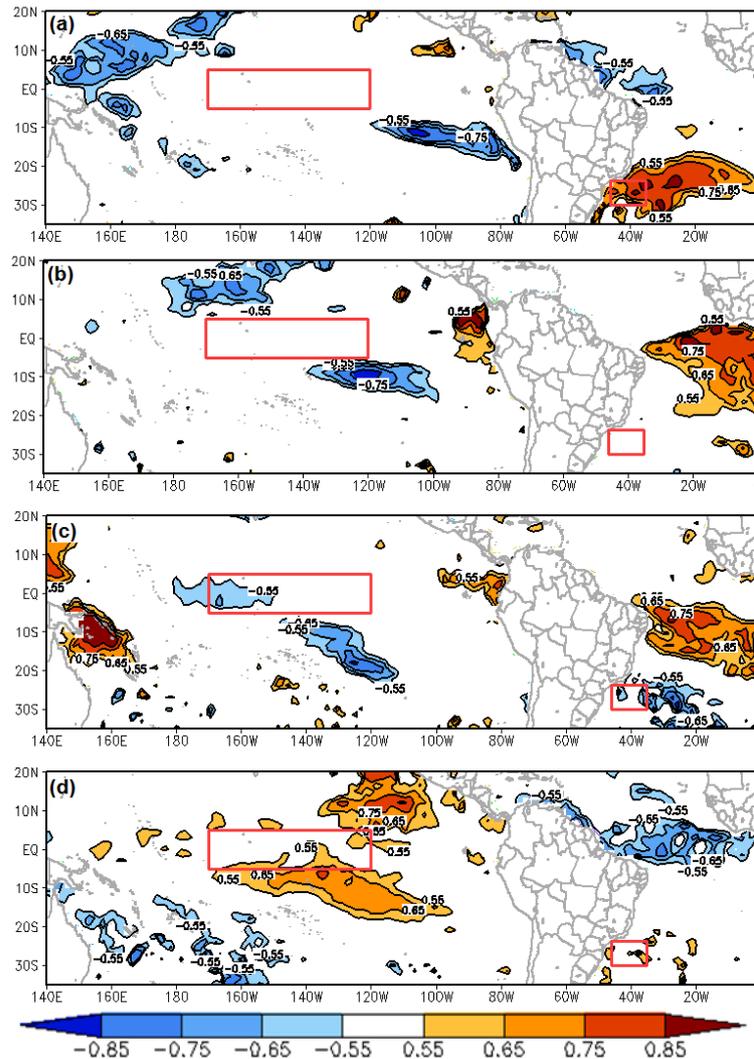


Figura A.11 - Distribuição dos coeficientes de correlação entre a anomalia de TSM e a intensidade da ilha de calor urbana na RMRJ, com 95% de significância (teste *t-student*): (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

No verão (Figura A.11a), a correlação entre a distribuição da anomalia de TSM e a IICU na RMRJ mostra o mesmo padrão que obtido com a temperatura do ar na Figura A.4. A TSM do Oceano Atlântico próximo à costa da RMRJ é a região que tem uma forte influência sobre IICU. Quanto à área do Niño 3.4, não se observa correlação entre a anomalia de TSM e a IICU, o que mostra que não há forçante remota associada com a influência do ENOS nesta estação do ano.

No outono, o comportamento da correlação da anomalia de TSM e a IICU não aponta um padrão, como se evidenciado para a temperatura do ar na Figura A.4.b. De acordo com a Figura A.11b, no outono não é observada

uma correlação significativa entre a anomalia de TSM do Pacífico Tropical e Atlântico Sul e a IICU. Isto mostra que, para a variável da temperatura do ar, os eventos ENOS atuam como uma forçante remota significativa, mas para o fenômeno da IICU, a TSM da região do Niño 3.4 não influencia remotamente os valores de IICU.

O inverno foi a estação que mais se destacou na análise da IICU. Na Figura A.11c, são mostrados valores de correlação negativa entre as anomalias de TSM no Pacífico e do Atlântico e da IICU. Esta oposição no comportamento de correlação indica que, quando há uma anomalia positiva nestes oceanos (aumento da TSM), há um enfraquecimento da IICU na RMRJ, e vice-versa.

Como discutido anteriormente, na análise da correlação entre a anomalia de TSM e a temperatura do ar, a primavera foi a que apresentou a maior influência da área remota do Niño 3.4. Este resultado também confirma a correlação entre a anomalia de TSM e a IICU de acordo com a Figura A.11d. Na primavera, devido as possíveis teleconexões, o impacto do ENOS é também observado no padrão da IICU. Portanto, a ocorrência de eventos El Niño (La Niña) na primavera pode ter um impacto sobre o fenômeno de escala local, como a intensificação (enfraquecimento) da IICU.

A.5 Conclusões Parciais

A distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre a variabilidade sazonal da temperatura média da RMRJ e da RMSP e a TSM permitiram a identificação de regiões oceânicas com impactos remotos sobre estas áreas urbanas. Estes resultados indicaram que os efeitos da região do Niño 3.4 na RMRJ ocorrem principalmente durante as estações de transição (outono e primavera); enquanto na RMSP é quase negligenciável, com um fraco sinal apenas durante a primavera. Além disso, uma forte correlação entre as anomalias de TSM do Oceano Atlântico Sul e a temperatura média urbana foi evidenciado durante todas as estações do ano, tanto para São Paulo como para o Rio de Janeiro.

Assim, para o RMRJ, além dos impactos locais, a temperatura urbana é controlada por uma competição (gangorra) entre a influência remota, tanto dos oceanos Pacífico Equatorial como o Atlântico Sul, durante a primavera e o outono, enquanto o impacto da última domina durante o verão e inverno. Por outro lado, para a RMSP, a forçante remota capaz de induzir aumento ou diminuição na temperatura urbana vem principalmente da área nas proximidades do Oceano Atlântico. Uma análise comparativa da série histórica das anomalias de temperatura médias mensais da RMRJ e os valores de ONI apontaram para uma relação entre a variabilidade interanual com fases positivas e negativas do ENOS. Contudo, para alguns anos, esta correspondência direta não é claramente observada, apontando para a necessidade de mais estudos para compreender melhor os mecanismos de competição entre o ENOS, impacto local do oceano vizinho e a forçante local.

Na análise da distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre a IICU na RMRJ e a TSM foi possível identificar as regiões oceânicas com significativa forçante remota e os impactos do fenômeno da ICU. A estação do verão com correlação mais significativa entre as anomalias de TSM do Oceano Atlântico Sul e a IICU, enquanto a primavera é a estação que o efeito da forçante remota associado com a região Niño 3.4 é mais intensa na IICU. Portanto, é durante a primavera que o impacto do ENOS é mais evidente, então valores positivos de anomalias de TSM no Oceano Pacífico Equatorial (ocorrência de El Niño) tendem a aumentar a IICU em RMRJ.

Os resultados indicam que, embora o fenômeno da ICU esteja diretamente estabelecido e dimensionado por características locais da área urbana, os padrões da TSM locais e remotos são capazes de influenciar o comportamento sazonal da temperatura do ar e intensificar ou enfraquecer a IICU, destacando assim, uma nova abordagem na estimativa e na caracterização da intensidade da ICU que deve ser explorado em estudos posteriores.

APÊNDICE B

Localização das estações



Figura B.1 - Estação Cerqueira Cezar: Latitude 23°33'12.4"S Longitude 46°40'23.4"W.

Fonte: Google Earth

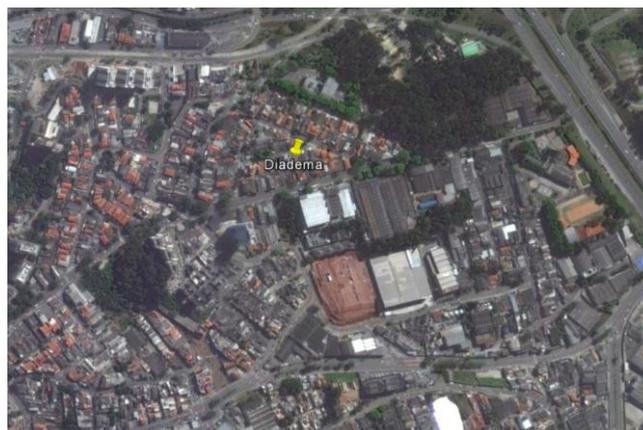


Figura B.2 - Estação Diadema: Latitude 23°41'15.36"S Longitude 46°36'42.72"W.

Fonte: Google Earth

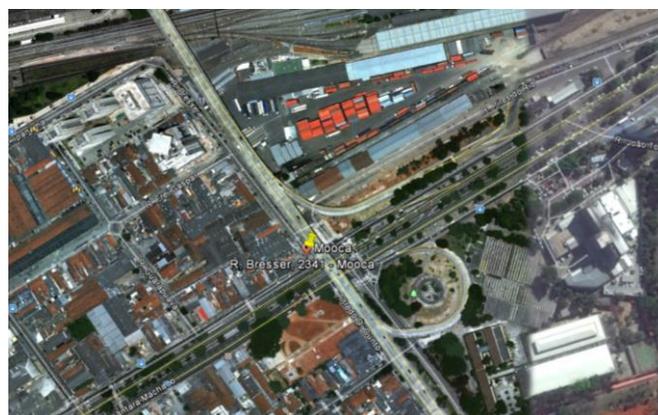


Figura B.3 - Estação Mooca: Latitude 23°32'52.72"S Longitude 46°36'11"W.

Fonte: Google Earth



Figura B.4 - Estação Parelheiros: Latitude $23^{\circ}47'37.65''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}38'32.50''\text{W}$.
Fonte: Google Earth

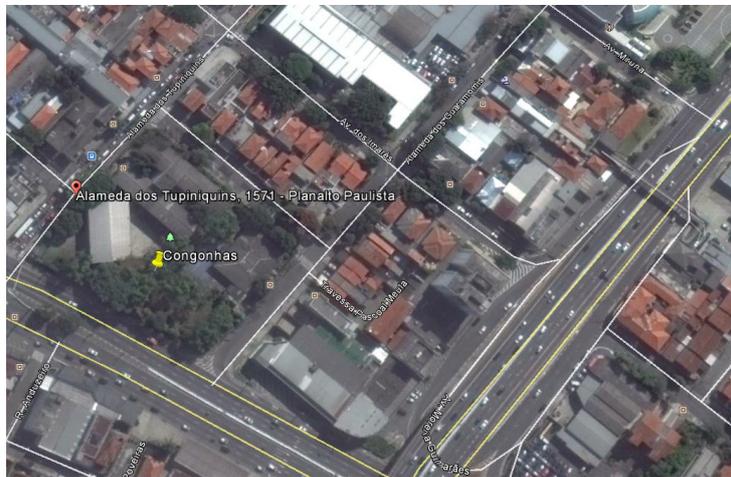


Figura B.5 - Estação Congonhas: Latitude $23^{\circ}37'10.01''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}39'34.19''\text{W}$.
Fonte: Google Earth

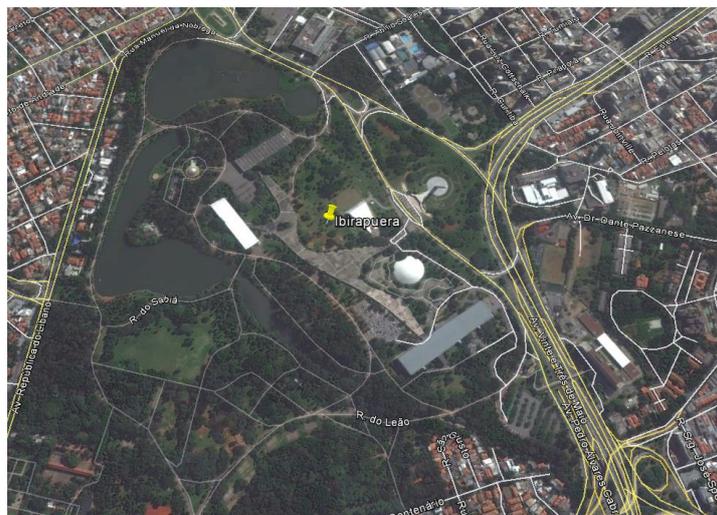


Figura B.6 - Estação Ibirapuera: Latitude $23^{\circ}35'8.84''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}39'27.04''\text{W}$.
Fonte: Google Earth



Figura B.7 - Estação Mauá: Latitude $23^{\circ}40'10.08''S$ Longitude $46^{\circ}27'56.13''W$.
Fonte: Google Earth



Figura B.8 - Estação N. Senhora do Ó: Latitude $23^{\circ}28'48.4''S$ Longitude $46^{\circ}41'32.3''W$.
Fonte: Google Earth

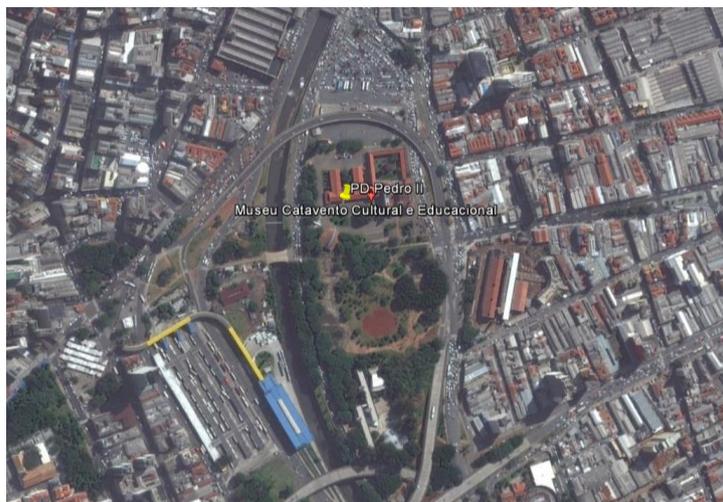


Figura B.9 - Estação PD Pedro II: Latitude $23^{\circ}32'39.7''S$ Longitude $46^{\circ}37'41.4''W$
Fonte: Google Earth

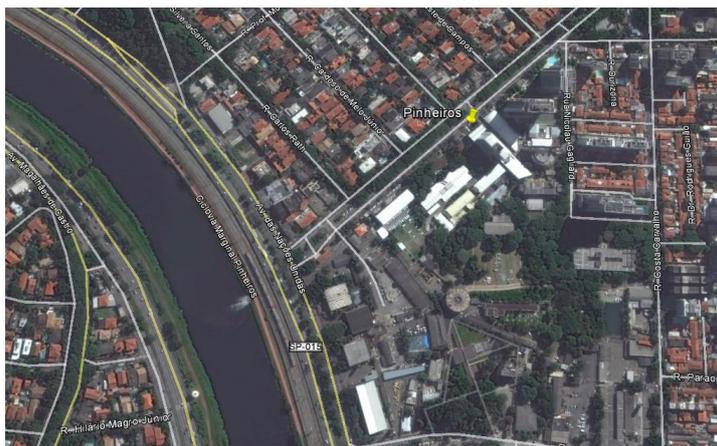


Figura B.10 - Estação Pinheiros: Latitude $23^{\circ}33'39.9''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}42'5.9''\text{W}$
Fonte: Google Earth

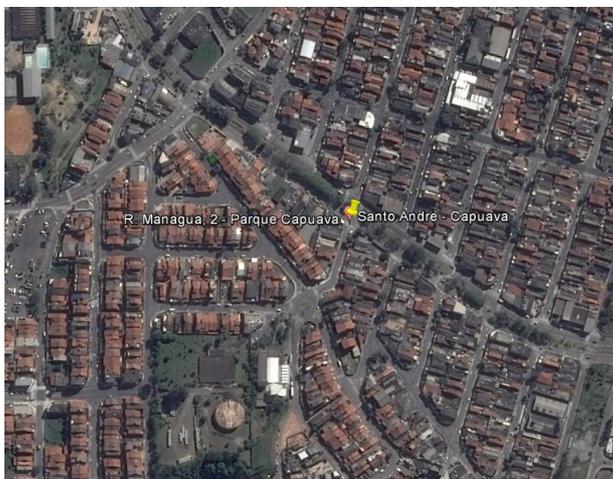


Figura B.11 - Estação Santo André: Latitude $23^{\circ}38'44.6''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}29'36''\text{W}$
Fonte: Google Earth

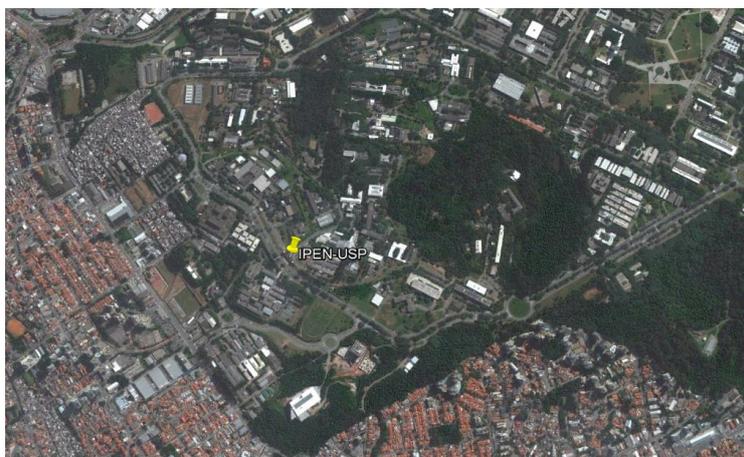


Figura B.12 - Estação IPEN-USP: Latitude $23^{\circ}38'44.64''\text{S}$ Longitude $46^{\circ}29'36.09''\text{W}$
Fonte: Google Earth

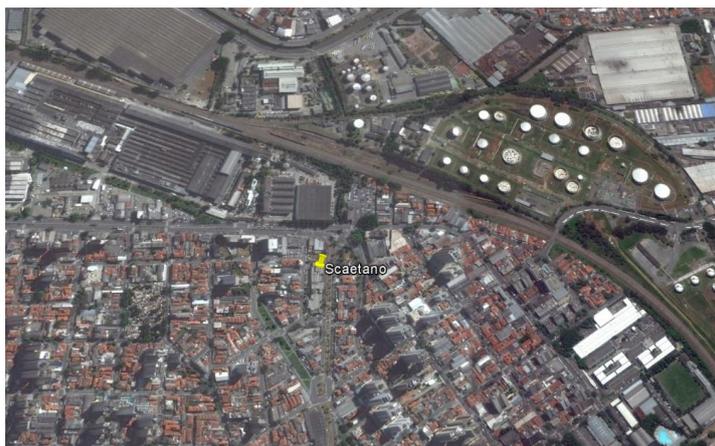


Figura B.13 - Estação São Caetano Sul: Latitude $23^{\circ}37'6.3''S$ Longitude $46^{\circ}33'22.8''W$.
Fonte: Google Earth

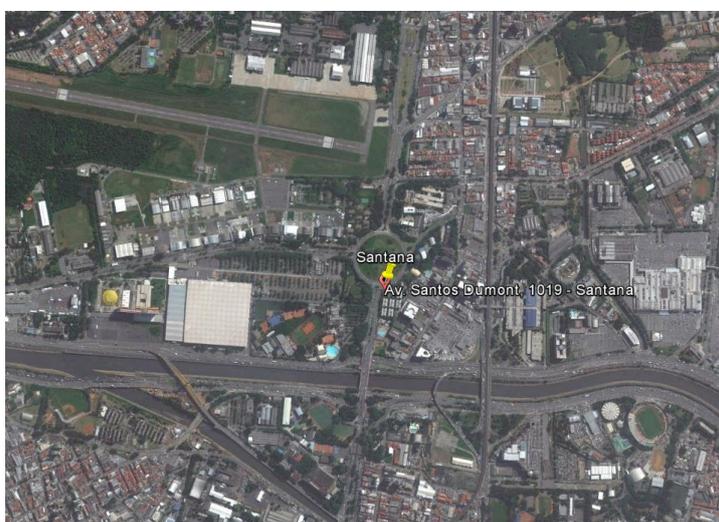


Figura B.14 - Estação Santana: Latitude $23^{\circ}30'55.5''S$ Longitude $46^{\circ}37'45.5''W$.
Fonte: Google Earth

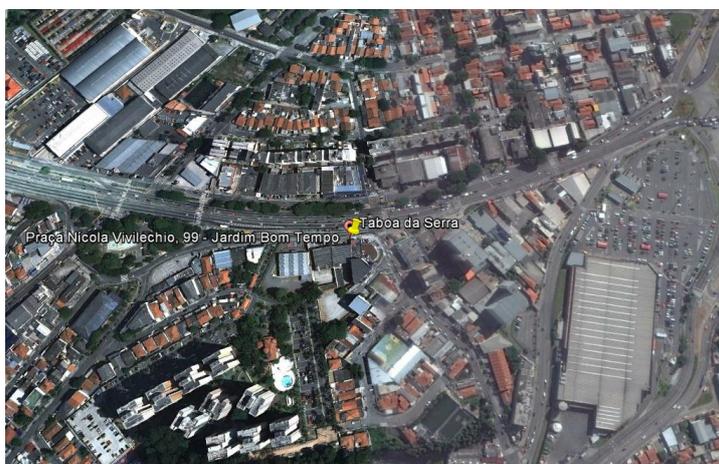


Figura B.15 - Estação Taboão da Serra: Latitude $23^{\circ}36'0.0''S$ Longitude $46^{\circ}45'0.0''W$.
Fonte: Google Earth

APÊNDICE C

Séries temporais

Comparações entre as observações dos poluentes e as simulações para os dois casos de estudo, dia 26 e 27 de setembro e dia 29 e 30 de setembro. Contudo, essa comparação não é realizada pontualmente por estação, mas é baseada na metodologia de análise de cluster apresentada no capítulo 3. Dessa forma são comparados os poluentes de cada grupo observado e simulado.

Grupos do CO:

Grupo 1 - Ibirapuera; Sto Amaro; Mooca, IPEN-USP; Parelheiros

Grupo 2 - Pinheiros; Taboão da Serra

Grupo 3 - P.D. Pedro II; São Caetano do Sul; Cerqueira Cezar

Grupo 4 - Congonhas

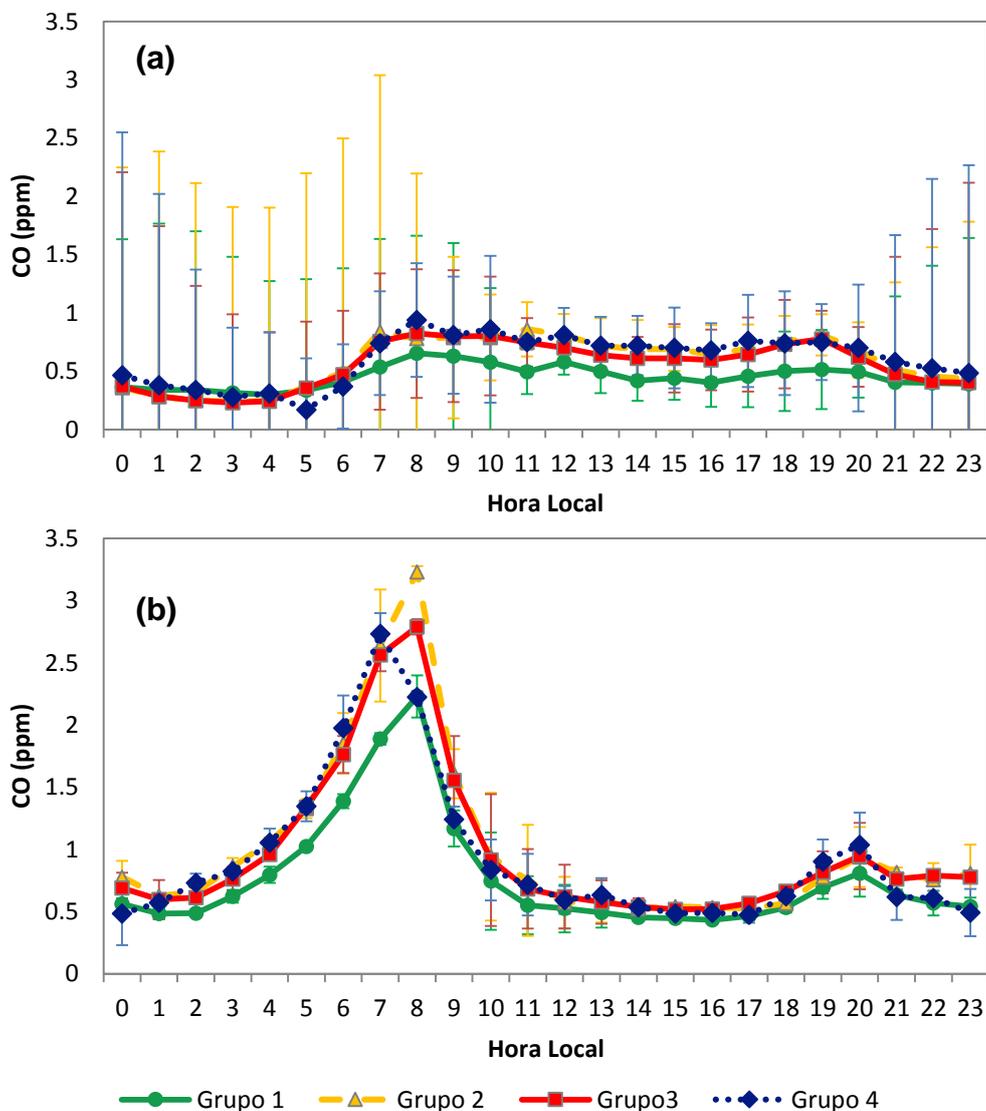


Figura C.1 - Série temporal do CO entre os dias 26 e 27 de setembro: (a) observação e (b) simulação.

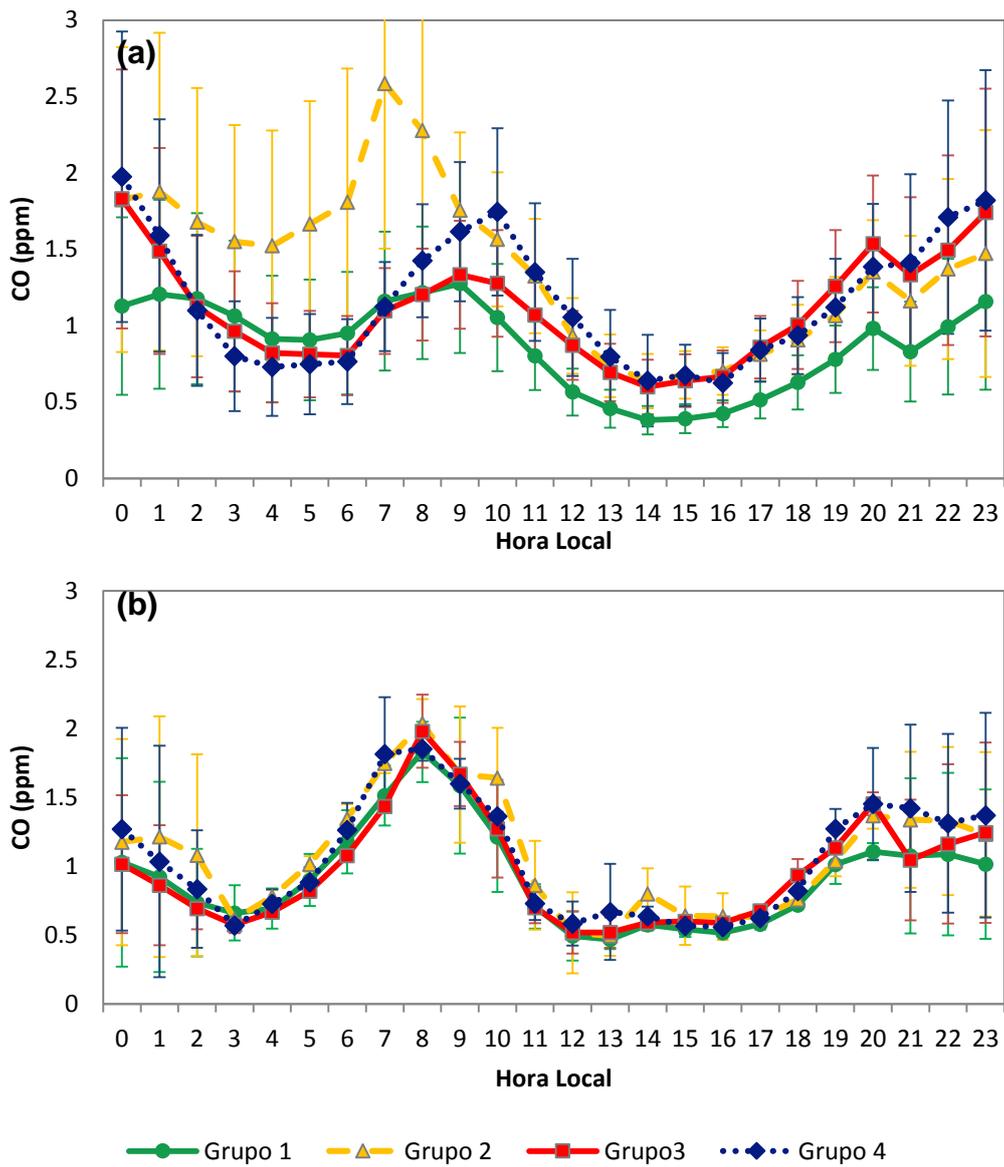


Figura C.2 - Série temporal do CO entre os dias 29 e 30 de setembro: (a) observação e (b) simulação.

Grupos do NO_x:

Grupo 1 - Ibirapuera; IPEN-USP; Mauá; Parelheiros

Grupo 2 - P.D. Pedro II ; São Caetano do Sul

Grupo 3 - Pinheiros; Taboão da Serra; Cerqueira Cezar

Grupo 4 - Congonhas

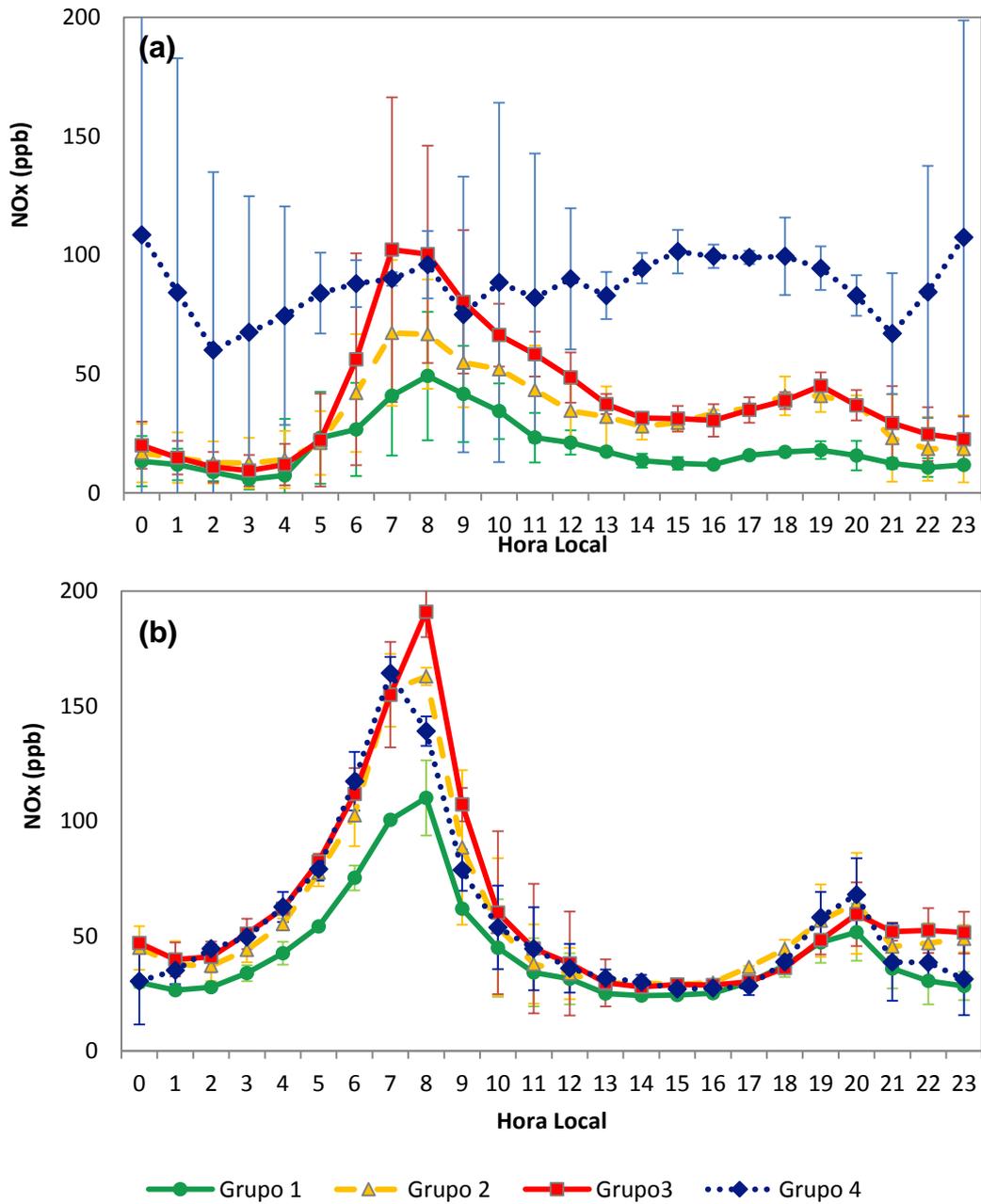


Figura C.3 - Série temporal do NO_x entre os dias 26 e 27 de setembro: (a) observação e (b) simulação.

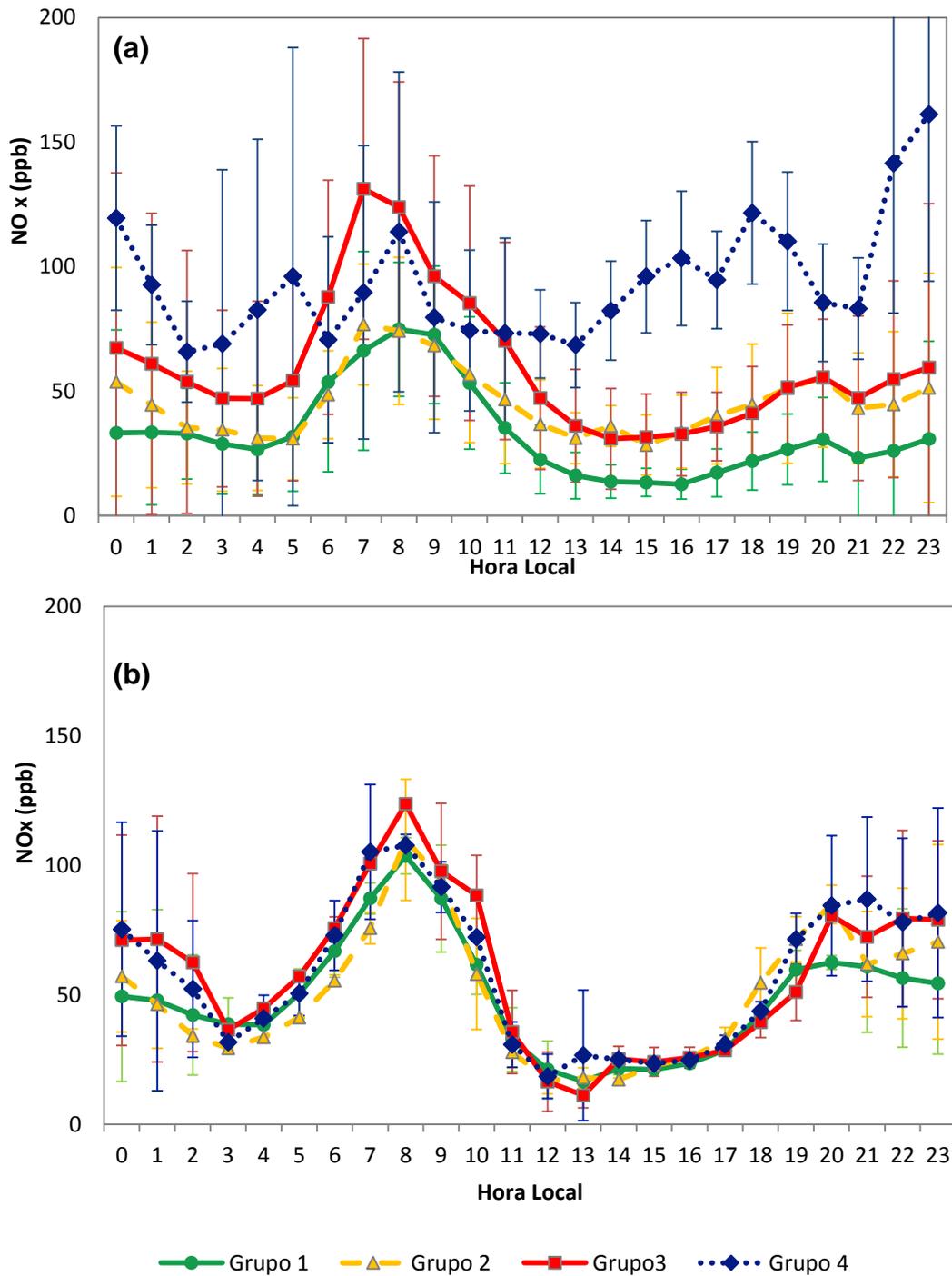


Figura C.4 - Série temporal do NO_x entre os dias 29 e 30 de setembro: (a) observação e (b) simulação.

Grupos do O₃:

Grupo 1 – Diadema, Santo André, Mauá, Santana

Grupo 2 – Santo Amaro e São Caetano do Sul

Grupo 3 – Ibirapuera, IPEN-USP

Grupo 4 - P. D. Pedro II e Pinheiros

Grupo 5 – Mooca e Nossa Senhora do Ó

Grupo 6 – Parelheiros (não apresentado aqui, já que não há dados observados no período da análise)

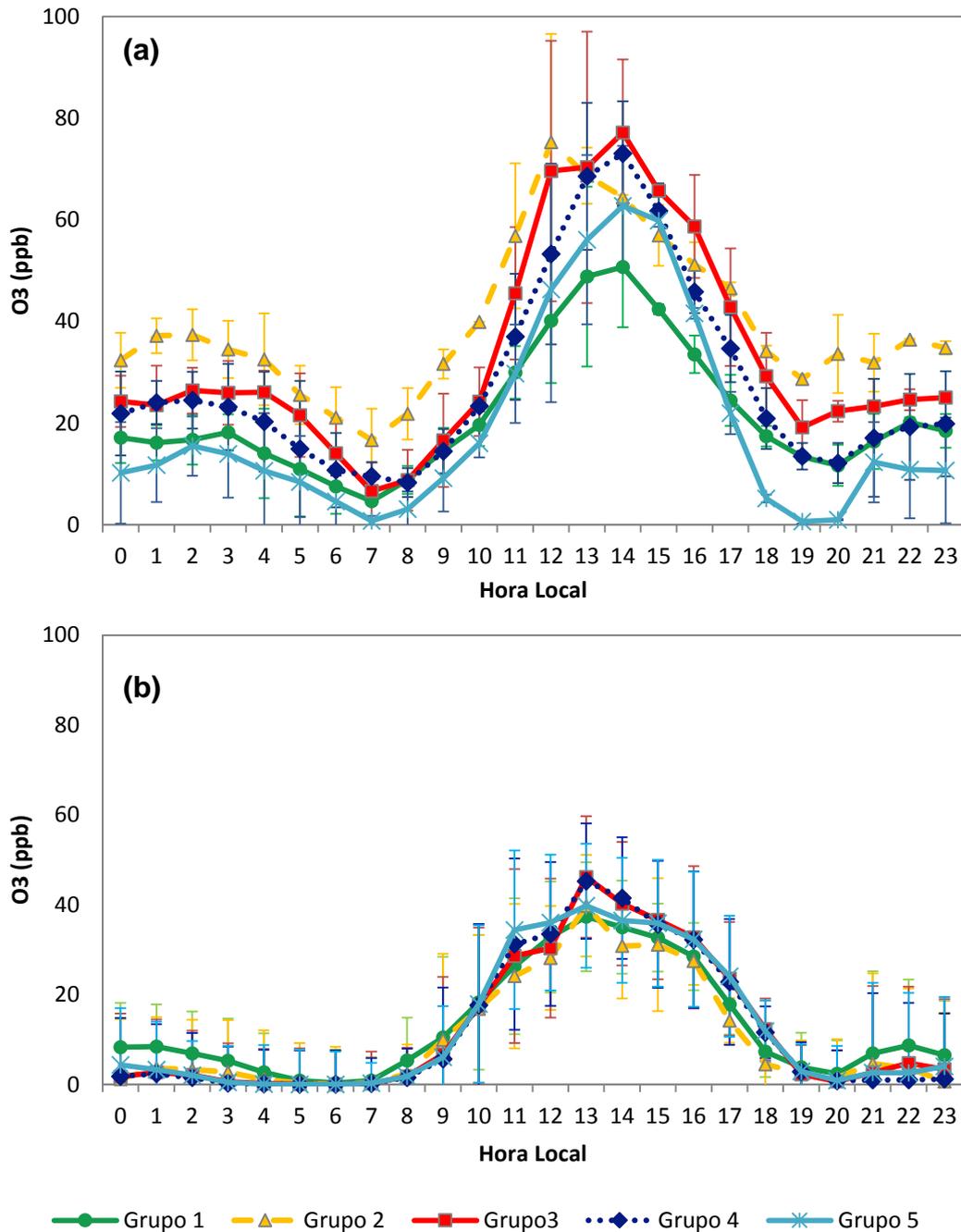


Figura C.5 - Série temporal do O₃ entre os dias 26 e 27 de setembro: (a) observação e (b) simulação.

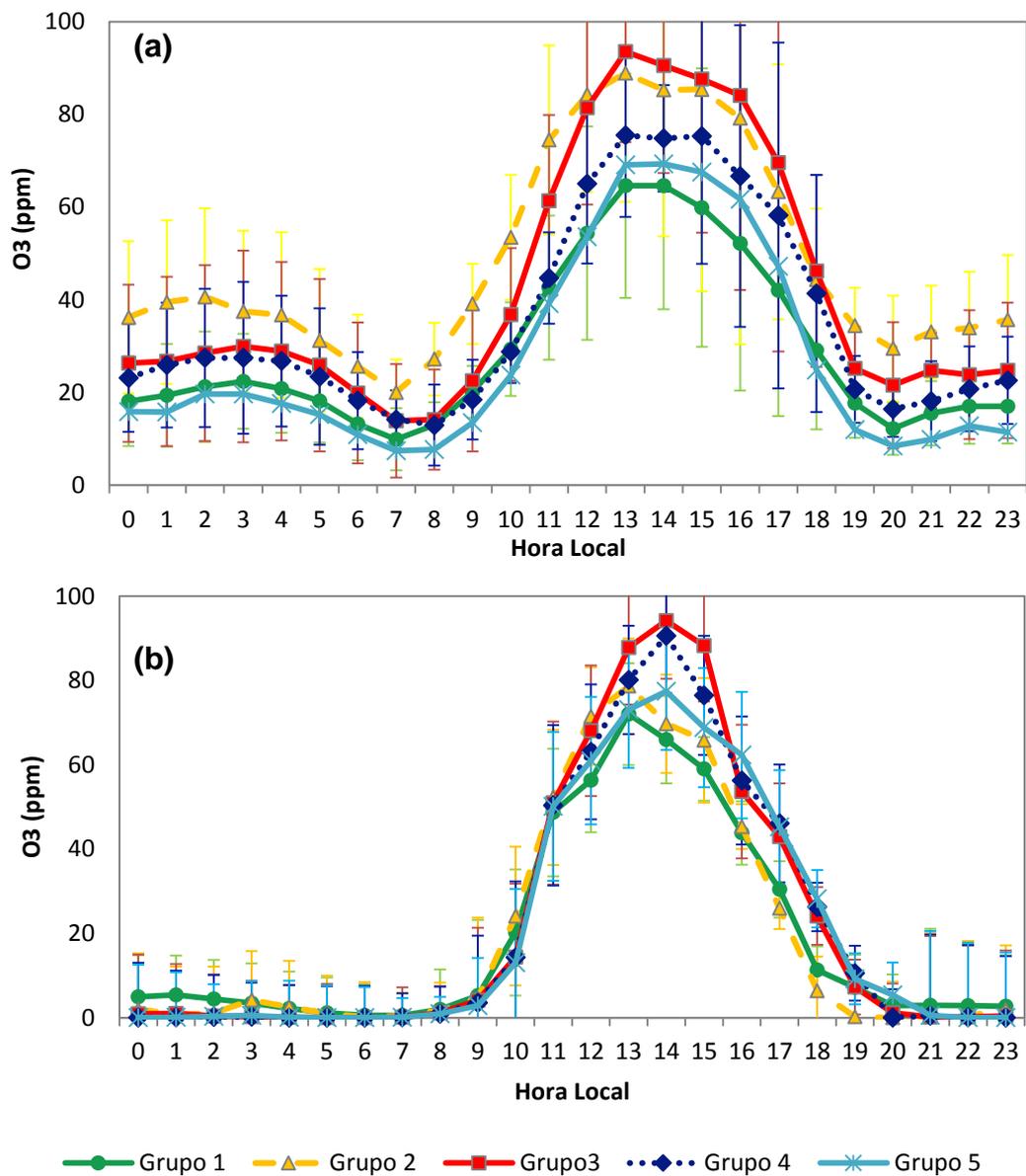


Figura C.6 - Série temporal do O₃ entre os dias 29 e 30 de setembro: (a) observação e (b) simulação.